

# 旋转电弧开关及其电弧运动速度特性

郭锐, 何俊佳, 赵纯, 陈立学, 潘垣

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

## A Rotating Arc Gap Switch and its Arc Velocity Characteristics

GUO Rui, HE Junjia, ZHAO Chun, CHEN Lixue, PAN Yuan

(College of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** A rotating arc gap switch controlled by axial magnetic field was designed and built to meet the needs of high voltage, high current, large charge transfers, slight electrode erosion and long lifetime. The magnetic field distribution in the gap was analyzed by ANSYS. The relationship between magnetic flux density in the gap and switch geometry and arc current was obtained. B-dot probes were employed to measure the arc rotating velocity. The current was trapezoid-like waveform and generated by a time-sequence discharge power supply. The current was in the range of 18~72 kA and magnetic flux density was 0.104~0.628 T. The arc velocity in different magnitude of magnetic flux density was obtained by changing the coil number and the results were compared with other rotating arc gap switches. The arc velocity has exponent relation to the axial magnetic field by fitting the experimental data. The results show that the arc velocity in this kind of switch is individually determined by axial magnetic field. It is significant different from other rotating arc devices which provide an external magnetic field.

**KEY WORDS:** rotating arc gap (RAG) switch; axial magnetic field; B-dot probe; arc rotating velocity

**摘要:** 为满足脉冲功率技术对闭合开关高电压、大电流、高电荷转移量、电极烧蚀小、寿命长的要求,设计了一种轴向磁场控制的旋转电弧开关。利用有限元软件分析开关间隙中驱弧磁场的位形及大小,得到间隙中磁感应强度与开关结构参数及电流大小的关系。采用 B-dot 探针测量电弧的旋转速度。实验电源为时序放电回路,在开关上得到近似梯形状的电流波形,实验中电流为 18~72 kA,磁感应强度为 0.104~0.628 T。通过改变上下线圈的匝数,得到在不同驱弧磁场下电弧的运动速度,并与其他旋转电弧开关的运动速度进行比

较。对实验数据进行拟合,可知电弧运动速度与间隙中的轴向磁感应强度大小成指数关系。该关系表明,所设计的开关中,电弧运动速度可以由间隙中的驱弧磁场惟一确定,这与外部磁场驱弧方式相比有很大的区别。

**关键词:** 旋转电弧开关; 轴向磁场; B-dot 探针; 电弧运动速度

## 0 引言

开关是脉冲功率技术中的关键部件之一,开关元件的参数和特性对脉冲波形有最直接、最敏感的影响。对气体火花开关来说,开关电极在击穿和燃弧时的烧蚀是影响开关性能和寿命的重要因素。

旋转电弧(rotating arc gap, RAG)开关作为高功率脉冲大电流闭合开关的一种,采用驱弧磁场使电弧沿着电极表面旋转,减小了电弧输入到电极表面的有效热流密度,从而减小了电极烧蚀,延长了开关使用寿命<sup>[1]</sup>,因此得到了研究人员的青睐。Rim 和 Cho 设计了一个横向磁场驱弧的旋转电弧开关作为电容器组的放电开关<sup>[2-3]</sup>,此开关有 2 个环形电极,被绝缘体支撑。在每个电极中有一个缺口,这些缺口彼此错开 180°放置。采用光电二极管测量了电弧的运动,当开关中通过 160 kA 电流时,电弧的运动速度为 1.2 km/s。韩国电工研究院设计了一种真空旋转电弧开关<sup>[4]</sup>,对开关进行了真空封装,用于电热化学炮的能源装置,其上下电极采用螺旋型。采用高速摄影仪器研究了电弧的运动,得到在 25 kA 峰值电流时,电弧运动速度为 0.6~1 km/s。另外,美国 L-3 communications 分别针对国家点火装置(national ignition facility, NIF)和兆焦耳激光装置(laser megajoule, LMJ)设计了旋转电弧开关,均能满足能源装置的性能要求,且寿命是目前两电极火

基金项目: 国家自然科学基金项目(50437020)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50437020).

花开关的4倍以上<sup>[5]</sup>,这两种旋转电弧开关现分别作为NIF和LMJ的备用开关<sup>[6-7]</sup>。从这些研究可以看出,针对旋转电弧开关的研究内容主要有:通流及电荷转移能力、电弧运动速度、电极烧蚀特性等。

## 1 开关结构及间隙中磁场分析

本文针对一种轴向磁场控制的旋转电弧开关<sup>[8-10]</sup>,研究其中电弧的运动特性。开关结构如图1所示,开关为两电极同轴圆柱结构,电弧为径向电弧。在开关的上下两端各设置一组产生驱弧磁场的线圈,上下线圈的匝数相同,且分别与内电极上下两端相连;线圈的绕向保证通过线圈的电流方向相同,其产生的磁场为轴向场,且为磁镜位形。对电弧的受力分析表明<sup>[9]</sup>,电弧将在电极中部作稳定的旋转运动。开关内部工作气体为一个大气压的空气。图2为开关样机照片。

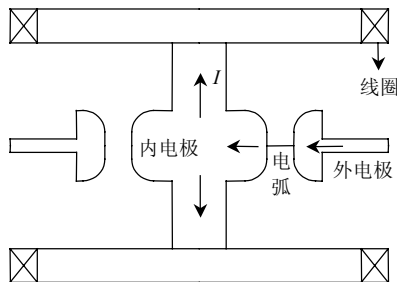


图1 旋转电弧开关示意图

Fig. 1 Sketch map of the RAG switch



图2 开关样机

Fig. 2 Photo of the rotating arc gap switch

开关内电极半径为50 mm,外电极内半径为70 mm,间隙距离为20 mm。线圈对称的布置在开关的上下两端,线圈截面为矩形,宽度为20 mm,厚度为6 mm,匝间距为6 mm。线圈内外半径分别为120和140 mm。上下线圈之间的最小距离为160 mm。由于线圈与内电极相连,当开关中通过电流时,线圈也通过电流,且大小为电弧电流的一半。开关在电路中的电感值如表1所示。

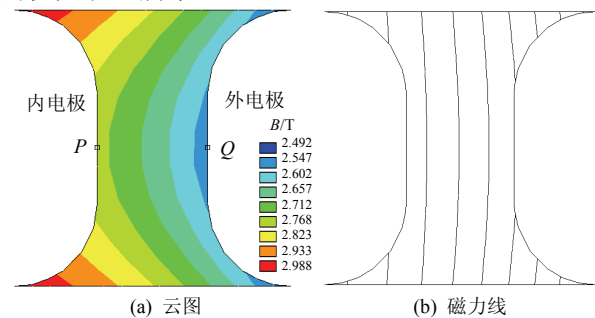
开关间隙中的轴向磁感应强度由线圈匝数和

表1 开关电感值及 $\alpha$ 值

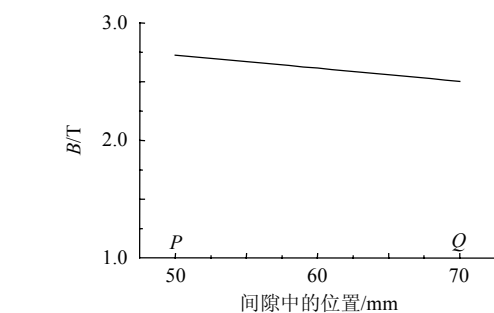
Tab. 1 Inductance of the switch and the value  $\alpha$

线圈匝数	电感/ $\mu\text{H}$	$\alpha$
2	1.35	$3.783 \times 10^{-6}$
3	2.06	$6.113 \times 10^{-6}$
4	4.20	$8.715 \times 10^{-6}$

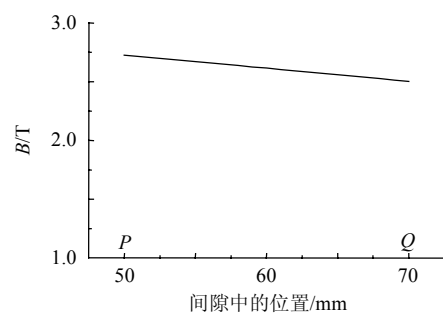
电流大小共同决定。采用有限元分析软件 ANSYS 对其进行二维静磁场计算,对开关施加载荷为300 kA、上下线圈各通过150 kA的电流,计算结果如图3所示。可以看到,间隙中的轴向磁感应强度分布较均匀,从内电极到外电极相差约9%,取平均值近似作为间隙中的磁感应强度值。因为开关中没有铁磁物质,所以该磁感应强度与电流大小成正比,在不同的线圈匝数下,可由式  $B=\alpha I$  表示, $\alpha$  的值如表1所示。



(a) 云图



(b) 磁力线



(c) 电极中部从内电极到外电极的轴向磁感应强度

图3 间隙中轴向磁感应强度

Fig. 3 Axial magnetic field in the gap

## 2 电弧运动速度测量

采用B-dot探针研究此开关中的电弧运动特性。B-dot探针是一个用细金属丝绕制而成的线圈,线圈中的感应电动势与磁通量的关系满足  $u=-d\phi/dt$ ,从电压信号波形可以判断电弧的位置<sup>[11]</sup>。探针线圈的轴向设置为与电弧运动圆周的切向平行,且放置在开关间隙的正下方。

图4为探针布置的示意图,探针截面积为  $4\pi \text{ mm}^2$ ,高度为4 mm,探针线圈匝数  $n=60$ ,距离电弧运动平面的高度  $h=45 \text{ mm}$ 。为了得到电弧运动速度随电流的变化规律,在一周内均匀布置6个探

针，如图 4(b)所示。

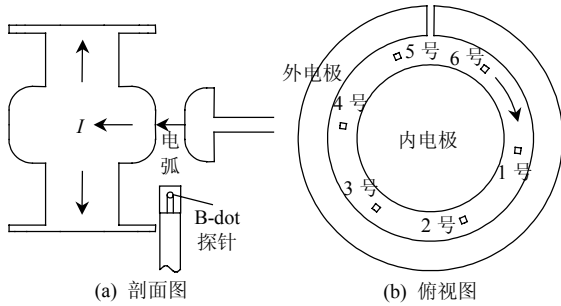


图 4 探针位置布置

Fig. 4 B-dot probes installation

为了更好地研究电弧的运动情况，借助多模块时序放电产生近似梯形状的电流波形，实验电路图如图 5 所示。该电路含有 8 个具有相同拓扑结构和电气参数的模块，每个模块含有一组储能电容器、一个三电极气体火花开关和一个  $20\mu\text{H}$  的电抗器。二极管和  $20\text{m}\Omega$  的电阻组成续流支路。设置开关 S1—S8 的放电时序，便可以在开关上得到需要的电流波形。实验时，在内外电极间搭接一根细金属丝，以在固定位置引燃电弧。实验中电流大小为  $18\sim 72\text{kA}$ ，线圈匝数分别为 4、3 和 2 匝。

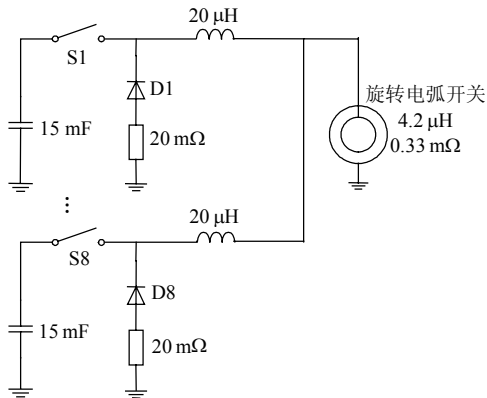


图 5 实验电路图

Fig. 5 Overall circuit diagram

图 6 为一组典型实验波形，4 个信号分别为电流波形和 1—3 号探针电压  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$  的波形。认

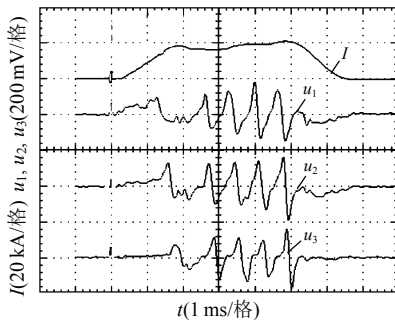


图 6 典型电流波形及探针电压信号波形  
Fig. 6 Typical waveforms of current and probe voltage signal

为信号波形的过零点对应于电弧经过探针正上方，这样，用 2 个探针的弧线距离除以对应 2 个过零点的时间差即得在这段时间内电弧的平均速度<sup>[11]</sup>。根据 6 个探针信号，可以得到在一次放电中电弧速度随电流波形的变化情况，进而可以得到在电流平顶段内电弧运动速度的平均值。

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 不同线圈匝数下电弧运动速度

图 7 为实验得到的不同线圈匝数下电弧的运动速度，每一个数据点表示一次实验中平顶电流下电弧的平均运动速度。从图 7 可以看出，电弧运动速度随着电流及线圈匝数的增大而增大。每一种线圈匝数下的电弧运动速度具有很强的相关性，可以用一个关于电流  $I$  的指数关系来表示。

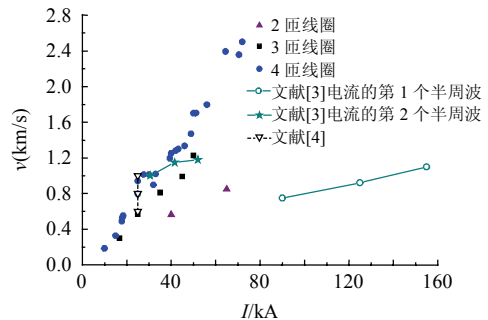


图 7 不同匝数下的电弧运动速度及与其他 RAG 中电弧速度的比较

Fig. 7 Arc velocity under different coils and compared to other RAG

另外 2 种旋转电弧开关(横向磁场驱弧的旋转电弧开关<sup>[3]</sup>和螺旋型电极真空旋转电弧开关<sup>[4]</sup>)的电弧运动速度也在图 7 中表示出来。文献[3]中实验电流波形为衰减的交流波，研究了在第 1 个周期的 2 个半波内电弧运动的平均速度。实验结果发现，电弧运动的第 1 圈和第 2 圈速度相差较大，且在第 2 圈较小的电流下得到了较大的速度。这种现象的原因为电极表面对电弧的阻力变小以及在电弧加热作用下导致气体压力即气体密度的减小。第 2 圈的速度在本文开关分别为 4 匝和 3 匝线圈时的数据之间，但是其斜率较小。文献[4]中实验电流为阻尼波，在上升时间为  $100\mu\text{s}$ 、脉宽为  $500\mu\text{s}$ 、峰值为  $25\text{kA}$  的电流下，电弧运动速度为  $0.6\sim 1.2\text{km/s}$ ，该数值与本文开关近似。

#### 3.2 电弧运动速度公式

在开关和其他等离子体发生装置中，磁驱电弧均被看作具有一定直径的圆柱体，其运动规律可以由式(1)进行描述<sup>[12-14]</sup>，该式表示电弧的运动由磁场

力和气体对弧柱阻力的平衡决定。

$$BI = C_D D \rho v^2 / 2 \quad (1)$$

式中： $B$  为磁感应强度； $I$  为电流； $C_D$  为气体阻力系数，是雷诺数的函数； $D$  为弧柱直径； $\rho$  为气体介质密度； $v$  为电弧运动速度。

在式(1)的基础上，由理论推导和实验结果可以得到速度关于上述各量的半经验公式，这些公式一般都具有指数的形式。在外部磁场驱弧的旋转电弧装置中，不同的装置给出了不同的关系<sup>[14-18]</sup>。在自身电流产生的磁场驱弧的开关装置中，研究人员尚未给出电弧速度与电流或磁场的关系，大部分仍沿用文献[18]的研究结果对其电弧运动速度进行描述<sup>[3,8]</sup>，而没有考虑到文献[18]结果的适用范围。

本文研究的开关属于自身电流产生的磁场驱弧，且间隙中的驱弧磁场与电弧自身电流大小成正比，比例关系如表1所示。因此，可以计算出图7中所有匝数下各点对应的磁感应强度大小，如图8所示，对所有的数据点进行指数拟合，得到

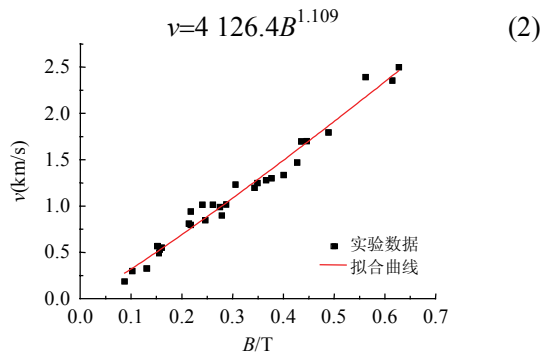


图8 电弧速度与间隙轴向磁感应强度的关系  
Fig. 8 Relationship between arc velocity and axial magnetic flux density in the gap

可见，尽管线圈匝数不同导致间隙中磁感应强度与电流的关系不同，电弧运动速度仍可以由间隙中磁感应强度单独确定。这与上述外部磁场驱弧装置的结果有明显不同。

从式(2)可以看出，要想增大电弧运动速度，就要增大间隙磁感应强度，这可以通过增大电流或增加线圈匝数2种途径达到。

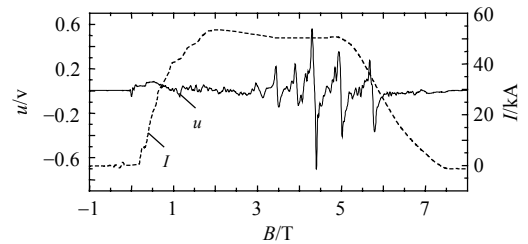
另外，根据图8和式(2)可知：在不同匝数下(如2匝和4匝)，当两者的轴向磁感应强度相同时，其电弧运动速度也相同。但是，根据表1中磁感应强度和电流的关系，在2匝条件下开关必然会通过更大的电流，电弧会受到一个更大的磁场驱动力，理应得到更大的运动速度。

研究表明，电弧的运动除受到磁场力和气动阻力之外，还受到电极表面对弧根的“阻滞”作用的

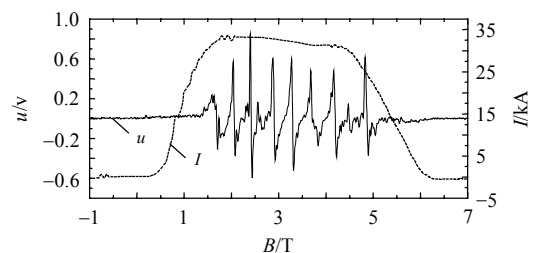
影响，特别是在大电流情况下<sup>[14,17,19-20]</sup>。本文开关中的电弧同样受到电极表面阻力的作用，因此，在弧根处，式(1)右边需加上电极表面阻力项。电极表面阻力通过弧根影响电弧的运动。这种作用是与电流大小相关的，当电流增大时，电极表面阻力也增大。因此，若在2匝和4匝情况下电流大小相同，根据表1可知，此时2匝下的轴向磁感应强度较小，磁场驱动力也比4匝时小，因而电弧运动速度较小。要想获得同样的电弧速度，就需要增大电流，与此同时电极表面阻力也随之增大。可见，当2匝情况下磁场驱动力增大到与4匝下相同时，仍不能得到相同的运动速度，电流需要进一步增大，当磁感应强度  $B$  达到相同时，电弧速度  $v$  相同，此时磁场驱动力比4匝情况下大，这个大出来的量用来平衡电极表面阻力的增量。

### 3.3 2匝线圈时电弧运动特性

当线圈匝数为2匝时，典型探针电压信号如图9(a)所示，可以看到，在前面几ms内，电弧几乎停滞不动；打开开关后发现起弧点附近烧蚀严重。图9(b)为未出现此种情况的典型信号波形(线圈匝数为4匝)。对3匝和2匝线圈时电流波形的比较发现，当线圈匝数为2匝时，即使在电流比3匝时大很多，电流上升率也高得多的情况下，仍然会出现起弧点严重烧蚀的现象。这说明电弧在运动的起始阶段不仅受磁场力的影响，可能更多的受到其他因素的影响，如电弧形态、磁场位形的变化及其对电弧形态的影响等等，还有待于进一步研究。



(a) 2匝线圈



(b) 4匝线圈

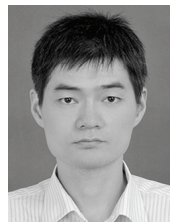
图9 2匝线圈时探针电压信号及与4匝线圈时对比  
Fig. 9 B-dot probe signal comparison between 2-turn and 4-turn coils

## 4 结论

本文针对一个轴向磁场控制的旋转电弧开关, 实验研究了其中电弧的运动特性。采用有限元软件对开关间隙中的磁场分布与大小进行了分析, 得到了不同匝数下间隙中的轴向磁感应强度与电流大小的关系。采用 B-dot 探针测量了电弧的运动速度, 通过改变线圈匝数得到在不同的驱弧磁场大小下电弧运动速度的变化。在实验数据的基础上得到了电弧运动速度与间隙中轴向磁感应强度的关系。结果表明, 该开关中的电弧运动速度可以由间隙磁场单独确定, 这与其他外部磁场驱弧装置得到的结果有明显区别。

## 参考文献

- [1] 何孟兵, 王清玲, 贺臣, 等. 旋转电弧对火花间隙开关电极烧蚀的影响[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(11): 1468-1472.  
He Mengbing, Wang Qingling, He Chen, et al. Influence of rotary arc on the feature and electrode erosion of spark switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(11): 1468-1472(in Chinese).
- [2] Rim G H, Cho C H. Design and testing of a rotary arc gap-switch for pulsed power[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2000, 28(5): 1491-1496.
- [3] Rim G H, Cho C H, Lee H S, et al. Experimental analysis of rotating arc behaviors in a rotary arc gap switch for a 500 kJ capacitor bank [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2001, 37(1): 358-361.
- [4] Seo K S, Lee T H, Hwang L H, et al. A high power vacuum rotary arc gap closing switch for pulsed power applications[C]/IEEE International Power Modulator Symposium. Hollywood, USA: IEEE, 2002: 366-369.
- [5] Savage M E. Final results from the high-current, high-action closing switch test program at Sandia National Laboratories[C]/IEEE International Pulsed Power Conference. California, USA: IEEE, 1999: 1238-1241.
- [6] Newton M, Smith D, Moore B, et al. Main amplifier power conditioning for the NIF[R]. California: Lawrence Livermore National Lab, 1999.
- [7] Mexmain J M, Rubin de Cevens D, Marret J P, et al. Pulsed power conditioning system for the megajoule laser[C]/IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas, USA: IEEE, 2003: 89-92.
- [8] 王清玲, 郭良福, 何孟兵, 等. 轴向磁场控制的旋转电弧开关的研制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 102-105.  
Wang Qingling, Guo Liangfu, He Mengbing, et al. Development of rotary arc-gap switch in axial magnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 102-105(in Chinese).
- [9] 何孟兵, 王清玲, 潘垣. 高库仑量大电流脉冲闭合开关的研制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 131-136.  
He Mengbing, Wang Qingling, Pan Yuan. Study on high coulomb and current pulse power closing switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 131-136(in Chinese).
- [10] 王清玲. 轴向磁场控制的旋转电弧开关的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
Wang Qingling. Development of rotary arc gap-switch in axial magnetic field[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006(in Chinese).
- [11] He Junjia, Guo Rui. Measurement of arc velocity in an arc-rotating pulsed power switch based on B-dot probes[C]/Pulsed Power Conference. Washington DC, USA: IEEE, 2009: 658-662.
- [12] Szente R N, Munz R J, Drouet M G. Effect of the arc velocity on the cathode erosion rate in argon-nitrogen mixtures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1987, 20(6): 754-756.
- [13] Szente R N, Munz R J, Drouet M G. Arc velocity and cathode erosion rate in a magnetically driven arc burning in nitrogen[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1988, 21(6): 909-913.
- [14] Szente R N, Munz R J, Drouet M G. The influence of the cathode surface on the movement of magnetically driven electric arcs [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1990, 23(9): 1193-1200.
- [15] Sharakhovsky L I. Experimental investigation of an electric arc motion in annular ventilated gap under the action of electromagnetic force[J]. Journal of Engineering Physics, 1971, 20(3): 306-313.
- [16] Essiptchouk A M, Sharakhovsky L I, Marotta A. A new formula for the rotational velocity of magnetically driven arcs[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(20): 2591-2597.
- [17] Chou S W, Hsu K L, Lin D L, et al. Experimental study on copper cathode erosion rate and rotational velocity of magnetically driven arcs in a well-type cathode non-transferred plasma torch operating in air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(7): 1944-1952.
- [18] Guile A E, Adams V W, Lord W T, et al. High-current arcs in transverse magnetic fields in atmospheric pressure[J]. Proceedings of the IEE, 1969, 116(4): 645-652.
- [19] Cheng Lichun, Xie Jiazhi. Motion of magnetically driven arcs on oxidized electrodes[J]. IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1982(1): 86-89.
- [20] Essiptchouk A M, Marotta A, Sharakhovshy L I. The effect of arc velocity on cold electrode erosion[J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(3): 1214-1219.



郭锐

收稿日期: 2010-07-12。

作者简介:

郭锐(1981), 男, 博士研究生, 研究方向为脉冲功率和等离子体技术, gr6655@163.com;

何俊佳(1968), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电压技术与脉冲功率技术, h-junjia@vip.sina.com。

(责任编辑 张玉荣)