

电极间距对真空电弧电压及 阳极熔池旋转速度影响的实验研究

王立军, 王流火, 贾申利, 杨鼎革, 高贺, 史宗谦

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

Experimental Study on Effects of Electrode Gaps on the High-current Vacuum Arc Voltage and the Rotation Speed of Anode Melting Pool

WANG Lijun, WANG Liuho, JIA Shenli, YANG Dingge, GAO He, SHI Zongqian

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University),
Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: High-current (10 kA rms, 20 kA rms) vacuum arc experiments were conducted in a detachable vacuum chamber for copper cup axial magnetic field (AMF) contacts with the electrode gaps of 10, 16 and 20 mm. The vacuum arc appearance and the rotation speed of melting pool were observed with the high-speed CCD video camera, and the arc voltage waveforms were measured at the same time. Based on the experimental measurement, the high-current vacuum arc voltage and characteristics of melting pool rotation on AMF contacts with different electrode gaps were analyzed. Experimental results showed that the arc tends to be unstable and the arc voltage gradually increases with increasing of the electrode gap, so do the radius and the rotation speed of the anode surface melting pool. The rotation speed of the anode melting pool is about 0.664 m/s and the metal pool's radius is about 14.5 mm with the electrode gap of 10 mm. In contrast, the rotation speed of anode melting pool is about 1.204 m/s and the melting pool's radius is about 15.6 mm with the electrode gap of 16 mm.

KEY WORDS: vacuum interrupter; axial magnetic field; arc voltage; pool rotation of melting

摘要: 在可拆卸真空灭弧室中对纯铜杯状纵向磁场电极分别

基金项目: 国家自然科学基金项目(50907045, 50707022); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0830); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200806981052, 2009020111015)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50907045, 50707022); Project Supported by Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-06-0830); Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (200806981052, 2009020111015)。

进行了间距 10, 16, 20 mm 的大电流(有效值为 10, 20 kA)燃弧实验, 用高速摄影仪拍摄电极间的电弧形态及阳极表面熔池的旋转运动, 并测量了电弧电压波形。以实验测量为基础, 分析研究了真空电弧在不同间距下的电弧电压特性、阳极表面熔池旋转运动。实验结果表明, 随着电极间距的增大, 电弧逐渐向不稳定态发展并且电弧电压逐渐增大。阳极表面熔池半径及金属液体旋转速度随着电极间距的增大而增大。电极间距 10 mm 的熔池旋转线速度大约为 0.664 m/s, 熔池半径大约为 14.5 mm; 而电极间距 16 mm 的熔池旋转线速度为 1.204 m/s, 熔池半径大约为 15.6 mm。

关键词: 真空灭弧室; 纵向磁场; 电弧电压; 熔池旋转

0 引言

由于真空灭弧室中电极间电弧电压便于测量, 能直观反映电弧状态和电弧能量的大小, 因此电弧电压常被作为真空电弧的重要特性之一来进行分析研究。真空电弧电压由 3 部分构成: 阴极压降、弧柱压降和阳极鞘层压降。已有研究结果表明: 阴极压降大约等于阴极表面材料的电离势, 其值与材料有关, 而与电弧电流、间距、纵向磁场的大小无关。阳极鞘层压降为负值, 其值与电子温度和电流密度相关^[1]。电极间距决定电极间纵向磁场的大小, 而纵向磁场对真空电弧特性有着极其重要的影响; 它可以维持真空电弧的扩散态, 抑制弧柱的收缩, 降低电弧电压, 防止触头表面局部烧蚀^[2-4]; 尤其在大电流条件下, 纵向磁场可使真空电弧维持在扩散态, 提高形成阳极斑点的电流阈值, 从而提高真空开关的极限开断能力^[5-7]。作者在最近的实验研究中

发现,在大电流情况下电极间电弧发生明显集聚,阳极表面出现熔化,伴随着阳极熔池旋转运动这一新现象。在熔池旋转运动过程中由于惯性离心力的作用伴随着大量的液滴外溅,电极间的介质绝缘强度降低,不利于电极间电弧的熄灭,进而影响真空开关的极限开断能力。因此,研究不同间距下的电弧电压特性和阳极表面的熔池旋转运动具有重要的理论意义和应用价值。

在本文的研究中,采用商用的纯铜杯状电极。在不同间距(10, 16, 20 mm)下进行大电流(有效值 10, 20 kA)燃弧实验,采用高速摄影仪拍摄电极间的电弧形态和阳极表面熔池旋转运动现象,同时记录电弧电压波形,分析了真空电弧在不同间距下的电弧电压特性,探讨总结了不同间距影响阳极表面熔池旋转速度的规律。

1 实验装置及设备

实验中使用直径 58 mm 纯铜杯状纵向磁场电极,产生“钟形”纵向磁场。电极结构模型如图 1 所示,分为 4 部分:触头片;触头环;触头基座;导电杆。

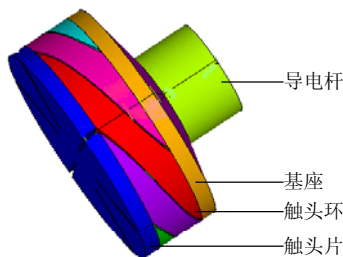


图 1 纵向磁场电极结构模型

Fig. 1 Structure of axial-magnetic-field electrode

图 2 为实验的主线路图。实验在可拆卸式真空灭弧室内进行,灭弧室内的气压为 $7\sim 4 \times 10^{-4}$ Pa。实验电流由单频 LC 振荡回路提供,实验电流频率为 50 Hz。图 2 中真空灭弧室的实验电极位置:上

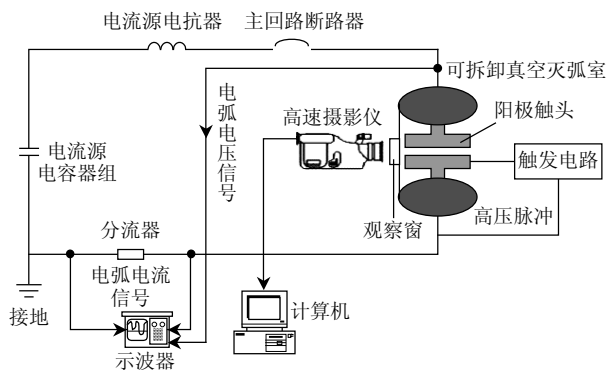


图 2 实验主线路图

Fig. 2 Experimental circuit

面电极为阳极,下面电极为阴极。实验采取火花触发的方式产生真空电弧,用高速摄影仪拍摄电弧形态和阳极表面熔池旋转运动。电弧电压通过高压探头测量,电弧电流通过分流器测量。实验电极的间距为 10, 16 和 20 mm。实验电流有效值为 10, 20 kA。加载实验电流前先进行几次小电流电弧老炼处理使实验电极表面达到清洁。

2 实验结果和分析

2.1 不同间距电极的纵向磁场分布及电弧电压特性

图 3 为纵向磁场杯状电极在不同间距下的磁场分布和电弧电压特性,实验电流有效值 10 kA。由图 3(a)可以看出,电极间中心区域的磁场强度 B_a 随电极间距的增大而减小,由 10 mm 间距的 82.88 mT 减小到 20 mm 间距的 64.34 mT,而电极边界区域磁场强度基本没有变化维持在 10 mT 左右^[8-9]。由图 3(b)可以看出,电弧电压 U_{arc} 变化的总体趋势是随着间距的增大而增大。这是因为电极间距增大,使得电弧路径增大,电弧电阻增大,进而使得电弧电压升高。虽然阳极鞘层负电位随间距的增大也有所增大,但弧柱电位的增大较明显,整体上电弧电压也有所增大。在小间距(10 mm)时,电弧电压波形比较平缓,没有突变和跳跃,主要是因为在小间距时电极间的纵向磁场强度较大对电弧等离子体产生一个约束作用,抑制了离子向外的运动,使电弧等离子体向外扩散的程度大为减弱,降低了径向离子和电子的损失,从而使得电弧电压的变化比较平缓^[10-11]。此外,纵向磁场可以抑制电极间带电粒子偏移磁力线的运动,从而抑制电流和等离子体向电极中心的收缩,减少能流在阳极中心的汇聚,使电流分布均匀,从而使得燃弧过程中的电弧电压变化比较平缓。在大间距(20 mm)情况下,电极间的纵向磁场强度明显减弱,对电弧的控制作用减弱^[12-16],从而使得纵向磁场不能很好地控制电弧的形态,出现了电弧的抖动,从而导致电弧电压出现突然间的跳跃,甚至出现大量的高频高幅噪声。电弧电压的噪声也与电极间的离子损失有关,间距越大,离子损失越多,电弧的抖动也就越大。此外,纵向磁场强度的减弱使得径向离子和电子的流失增多,加剧了电弧电压的突变^[17]。

图 4 为电极间距为 10 和 16 mm、电流(有效值 10 kA)峰值时刻的电弧图片。可以看出,电极间距 10 mm 时相对于 16 mm 时的电弧分布明显比较均匀,电弧半径大,扩散态好,无集聚态^[17-21]。在间

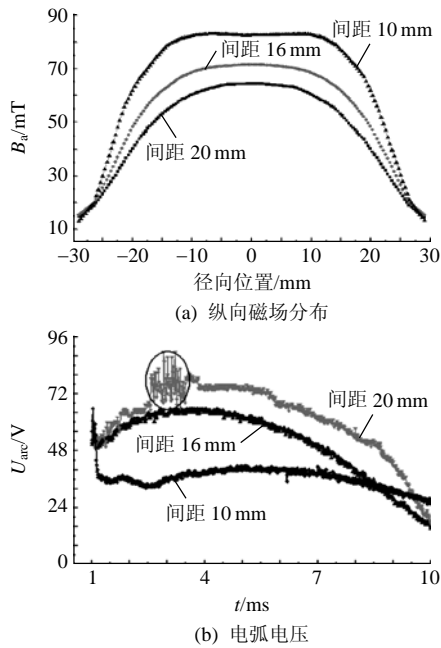


图 3 不同间距电极的纵向磁场分布和电弧电压
Fig. 3 Distribution of axial magnetic field on the center plane between contacts and the arc voltage under different gap distances

距 16 mm 时电极间电弧出现了明显的收敛, 甚至出现了集聚现象^[22-23]。在靠近阴极的电弧中心区域电弧亮度大、能量高, 这也验证了在大间距时电弧电压比较高的结论。图中电弧向右偏转是因为实验合成回路装置产生的磁场作用于电弧, 电极间电弧受到一个向右的洛仑兹力使得电极间电弧向右偏。

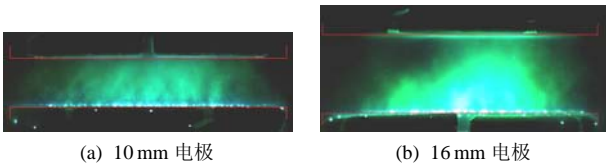


图 4 电极间距分别为 10 和 16 mm, 电流(有效值 10 kA)峰值时刻的电弧图片(下面电极为阴极)

Fig. 4 Pictures of arc column at peak moment of current (10 kA rms) with the electrode gap distances of 10 and 16 mm (lower electrode is cathode)

2.2 电极表面熔池旋转运动速度

实验中观察到纯铜杯状纵向磁场电极在大电流(有效值 20 kA)情况下电极表面开始融化, 并出现熔池旋转运动的现象。电极间距为 16 mm, 6.97 ms 时刻的电弧图片如图 5 所示, 图中圆圈内明亮点为携带有大量能量外溅的液滴。

从下朝上观察阳极, 熔池沿着顺时针方向旋转。阳极熔池旋转起始于阳极集聚斑点, 熔池半径在燃弧的半个周期内不断扩大, 沿着阳极表面径向方向朝外扩散。在熔池旋转向外扩散的过程中熔池边缘区域在阳极表面形成了许多突起。当熔池旋转

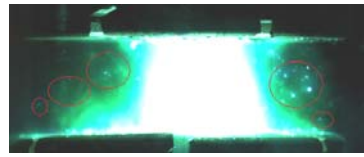


图 5 电极间距为 16 mm, 电流(有效值 20 kA)6.97 ms 时刻的电弧图片(下面电极为阴极)

Fig. 5 Pictures of arc column at 6.97 ms and peak current (20 kA rms) with the electrode gap distance of 16 mm (lower electrode is cathode)

较快时, 由于惯性离心力的作用一部分突起金属液体在旋转的过程中演变成向外飞溅的液滴, 液滴携带有大量的能量易引发电极间电弧的重燃, 对于电弧的熄灭十分不利^[22-23]。电极间距 10 mm 时, 阳极表面典型的突起高度大约在 0.6 mm, 最高能达到 1.5 mm; 电极间距 16 mm 时, 阳极表面典型的突起高度大约在 1.9 mm, 最高能达到 2.6 mm。依据文献[24], 电极间距 10 mm 的旋转熔池的熔化深度最大可达到 0.15~0.22 mm, 而电极间距 16 mm 的熔池深度大约为 0.24~0.30 mm。实验后测量知, 电极间距 10 mm 的熔池半径大约为 14.5 mm, 电极间距 16 mm 的熔池半径大约为 15.6 mm^[25]。

在电流过零后如果电极间的金属蒸汽过多易引起电极间电弧重燃, 导致熄弧失败。图 6 为电流(有效值 20 kA)10.78 ms 时刻, 间距分别为 10 和 16 mm 的燃弧图片和电弧电压, 其中 U_{rog} 为罗果夫斯基线圈输出电压。由图 6(a)、(b)可以看出, 阳极熔池旋转时在电极间不仅存在着大量的金属蒸汽, 还有许多可见明亮液滴。这些携带有大量能量的液滴与电极发生的碰撞被认为是引发电弧重燃的一个重要因素。在图 6(c)、(d)中可以看出, 在电流刚过零的时刻电极间的电弧电压迅速增大, 主要是因为电流刚过零时存在于电极间的大量金属液滴还未来得及冷却固化, 增大了电极间的电阻, 从而引发电弧电压突然升高。

对熔池的旋转速度的计算, 选取在同一实验中不同时刻的熔池旋转运动图片, 分别标记出熔池相同边缘点在不同时刻的位置, 进而求取熔池的旋转速度。图 7 和图 8 分别为电极间距 10 和 16 mm, 电流(有效值 20 kA)不同时刻的熔池旋转运动图片。表 1 和表 2 分别给出了电极间距 10 和 16 mm 时, 通过测量软件测得熔池边缘对应点的运动距离。

由表 1, 2 和图 7, 8 数据可以看出, 电极间距 16 mm 时熔池的旋转速度明显大于电极间距 10 mm 时熔池的旋转速度。电极间距 16 mm 的熔池旋转线速度大约为 1.204 m/s, 而电极间距 10 mm 的熔池旋

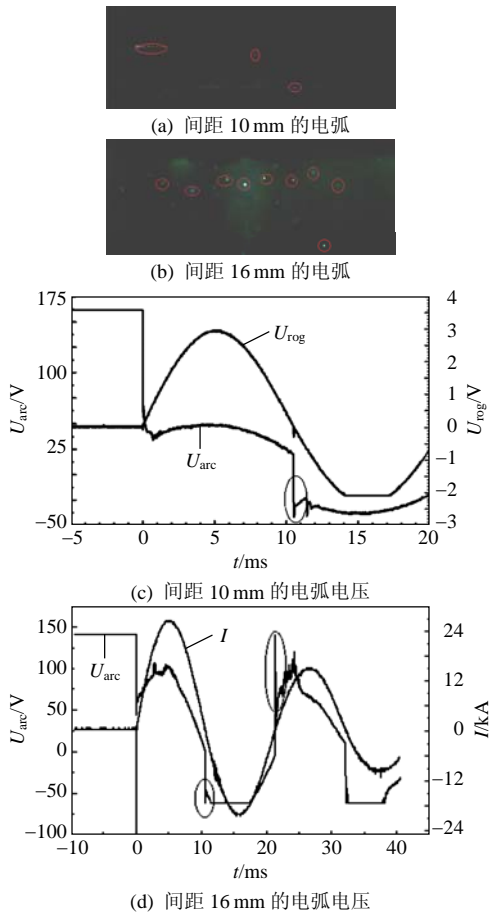


图 6 电流(有效值 20 kA)10.78 ms 时刻, 间距分别为 10 和 16 mm 的燃弧图片和电弧电压(下面电极为阴极)
Fig. 6 Pictures of arc column at 10.78 ms of current (20 kA rms) and waveforms of arc voltage with the electrode gap distance of 10 and 16 mm (lower electrode is cathode)

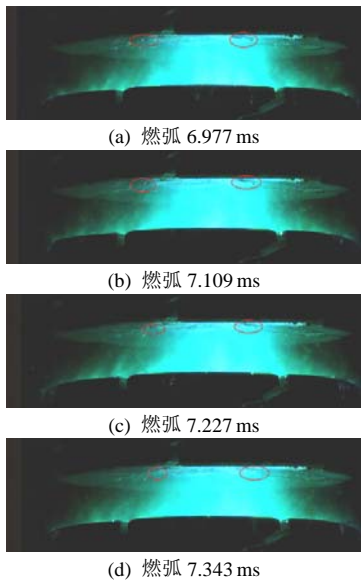


图 7 电极间距 10 mm, 电流(有效值 20 kA)不同时刻的熔池旋转运动图片(下面电极为阴极)
Fig. 7 Pictures of rotation of melting pool at current (20 kA rms) and different time with the electrode gap distance of 10 mm (lower electrode is cathode)

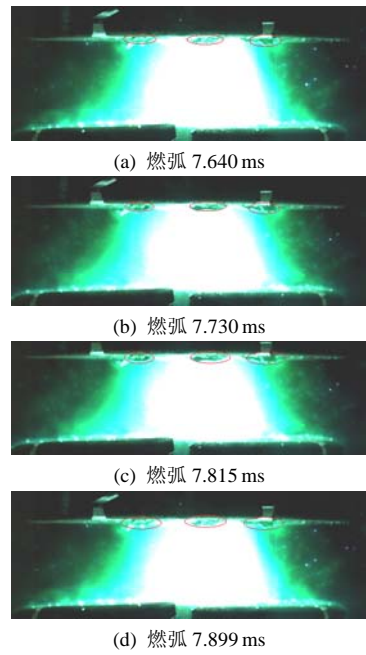


图 8 电极间距 16 mm, 电流(有效值 20 kA)不同时刻的熔池旋转运动图片(下面电极为阴极)
Fig. 8 Pictures of rotation of melting pool at current (20 kA rms) and different time with the electrode gap distance of 16 mm (lower electrode is cathode)

表 1 电极间距 10 mm 的实验数据
Tab. 1 Experimental data with the electrode gap distance of 10 mm

时段	时间间隔/ms	运动距离/mm	速度/(m/s)
6.977—7.109 ms	0.132	0.091	0.089
7.109—7.227 ms	0.118	0.081	0.081
7.227—7.343 ms	0.116	0.074	0.071

注: 表中运动距离对应的 2 个数值分别为相对应突起在时段内运动的距离。

表 2 电极间距 16 mm 的实验数据
Tab. 2 Experimental data with the electrode gap distance of 16 mm

时段	时间间隔/ms	运动距离/mm	速度/(m/s)
7.640—7.730 ms	0.090	0.111 0.124 0.110	1.28
7.730—7.815 ms	0.085	0.102 0.103 0.096	1.19
7.815—7.899 ms	0.084	0.090 0.094 0.088	1.10

注: 表中运动距离对应的 3 个数值分别为相对应突起在时段内运动的距离。

转线速度仅为 0.664 m/s。结合图 6 可以得知, 熔池旋转越快产生的外溅金属液滴也就越多, 电弧也就越不容易熄灭。

由于侵蚀机制的不同, 阳极的侵蚀率明显比较严重且集中在电极中心区域。由于阴极表面存在大量的阴极斑点, 电极的烧蚀主要是在阴极斑点处, 侵蚀比较均匀。对阳极而言, 弧柱区域的等离子体到达阳极时对阳极有一个很大的压力, 电弧在电磁力的作用下到达阳极时会发生收缩, 特别是在大电流时电弧在到达阳极表面时会产生明显的电弧集

聚, 因此, 对阳极的侵蚀就集中在电极中心区域且明显严重很多^[25], 如图 9 所示。



图 9 电极间距 16 mm, 电流分别为 15 和 20 kA 的电弧烧蚀后的电极

Fig. 9 Pictures of electrode after melting at arc current of 15 and 20 kA with the electrode gap distance of 16 mm

3 分析讨论

本文分析了不同间距对电弧电压特性的影响。由第 2 节实验结果可知, 电极间距增大电极中心区域磁场强度减小, 电弧电压升高, 且电弧随着间距的增大向不稳定态发展伴随着电弧出现噪声和抖动。纵向磁场的减弱使得对真空电弧的控制减弱, 从而降低了真空电弧维持在扩散态的电流阈值。大间距(20 mm)情况下, 电弧电压出现了明显的毛刺和跳跃。这主要是因为电极间距增大, 电极间纵向磁场减弱进而不能有效抑制电子和等离子体的外溢, 径向离子和电子的损失增多, 使得电弧出现剧烈的抖动。真空电弧电压升高的另一因素是电极间距增大, 电弧电阻增大, 电弧电压升高。虽然在电极间距增大的过程中阳极鞘层负电位也有所增大, 但是弧柱电位的增幅较大, 因此整体上电弧电压也有所增大。

实验中的熔池旋转区域(熔池半径和深度足够大)产生了大量的金属流体, 为形成大量大于 1 mm 的突起提供了足够的流动液体。燃弧过程中旋转熔池产生的外溅液滴携带大量的能量在一定程度上降低了电极间的绝缘强度, 从而不利于电弧的熄灭。

对造成熔池旋转的原因目前还没有被广泛接受的合理解释。在大间距时电弧电压大, 输入电极

间的能量大, 到达阳极的能量多, 且大间距时电弧等离子体在到达阳极表面时的速度大、动能大, 为熔池液体快速旋转提供了必须的大量能量。本文认为纵向磁场对熔池旋转起着重要的作用。关于纵向磁场对熔池旋转的影响, 本文作者还会进一步进行相关的实验研究。

4 结论

1) 电极间距增大, 电弧电阻增大, 电极间纵向磁场减弱, 电弧电压升高;

2) 大间距出现的电弧电压跳跃主要是由于纵向磁场减弱, 进而不能很好地控制电弧, 出现躁动现象, 最终引发了电弧电压的突变;

3) 不同电极间距下电极表面熔池的旋转速度的差异较大, 大间距下熔池旋转速度明显较快。旋转速度越快外溅的液滴也就对开关的开断越不利。

参考文献

- [1] 王立军, 贾申利, 史宗谦, 等. 开距对不同状态下真空电弧特性影响的仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 154-160. Wang Lijun, Jia Shenli, Shi Zongqian, et al. Simulation analysis of influence of electrode separations on vacuum arcs characteristics under different states[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 154-160(in Chinese).
- [2] Gundlach H C W, Interaction between a vacuum arc and an axial magnetic field[C]. VIIIth International Symposia on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Albuquerque, 1978.
- [3] Keidar M, Schulman M B. Modeling the effects of an axial magnetic field on the vacuum arc[J]. IEEE Trans. on Plasma Sciences, 2001, 29(5): 684-689.
- [4] Schellekens H. 50 years of TMF contacts design considerations: discharges and electrical insulation in vacuum[C]. 23rd International Symposia on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Bucharest, Romania, 2008.
- [5] 尚文凯, 王季梅. 大电流真空电弧收缩现象的研究[J]. 中国电机工程学报, 1989, 9(2): 32-41. Shang Wenkai, Wang Jimei. Study on constriction of high current vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 1989, 9(2): 32-41(in Chinese).
- [6] Schulman M B, Schellekens H. Visualization and characterization of high-current diffuse vacuum arcs on axial magnetic field contacts[J]. IEEE Trans. on Plasma Sciences, 2000, 28(2): 443-451.
- [7] Schellekens H, Schulman M B. Contact temperature and erosion in high-current diffuse vacuum arcs on axial magnetic field contacts[J]. IEEE Trans. on Plasma Sciences, 2001, 29(3): 452-461.
- [8] Slade P G, The vacuum interrupter: theory, design and application [M]. CRC Press, New Brunswick, 2008.
- [9] 王立军, 贾申利, 史宗谦, 等. 真空电弧磁流体动力学模型与仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 113-118. Wang Lijun, Jia Shenli, Shi Zongqian, et al. MHD model and simulation research of vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 113-118(in Chinese).

- [10] Shi Zongqian, Jia Shenli, Wang Lijun, et al. The influence of axial magnetic filed distribution on high-current vacuum arc[C]. 23rd International Symposia on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Bucharest, Romania, 2008.
- [11] Heberlein J V R, Gorman J G. The high current metal vapor arc column between separating electrodes[J]. IEEE Trans. on Plasma Sciences, 1980, 8(4): 283-288.
- [12] Niwa Y, Funahashi T, Yokokura K, et al. Basic investigation of a high speed vacuum circuit breaker and its vacuum arc characteristics[J]. IEE Proceedings: Gneration, Transmission and Distribution, 2006, 153(1): 11-15.
- [13] Chaly A M. Magnetic control of high current vacuum arcs with the aid of an axial magnetic field: a review[J]. IEEE Trans. on Plasma Sciences, 2005, 33(5): 1497-1530.
- [14] 王立军, 贾申利, 史宗谦, 等. 大电流真空电弧磁流体动力学模型与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 174-180. Wang Lijun, Jia Shenli, Shi Zongqian, et al. MHD model and simulation of high-current vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 174-180(in Chinese).
- [15] Izraeli I, Boxman R L, Goldsmith S. The current distribution and the magnetic pressure profile in a vacuum arc subject to an axial magnetic field[C]. 12th International Symposia on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Shosh, 1986.
- [16] 武建文, 王毅, 王季梅. 不同触头开距下真空电弧现象的研究[J]. 高压电器, 1997, 33(4): 22-25. Wu Jianwen, Wang Yi, Wang Jimei. The research of vacuum arc phenomenon under different electrode separations[J]. High Voltage Apparatus, 1997, 33(4): 22-25(in Chinese).
- [17] Keidar M, Schulman M B. Modeling the effects of an axial magnetic field on the vacuum arc[J]. IEEE Trans. on Plasma Sciences, 2001, 29(5): 684-689.
- [18] Chaly A M, Logatchev A A, Zabello K K, et al. High-current vacuum arc appearance in non-homogeneous axial magnetic field[C]. 20th International Symposia on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Tours, France, 2002.
- [19] Rowe S W, Barrault M. Dynamic interactions between a vacuum arc and circuit-breaker walls[C]. XIth IEEE International Conference on Pulsed Power, Baltimore, 1997.
- [20] Homma M, Somei H, Niwa Y, et al. Physical and theoretical aspects of a new vacuum arc control technology: selfarc diffusion by electrode; SADE[J]. IEEE Trans. on Plasma Sciences, 1999, 27(4): 961-968.
- [21] Schulman M B. Effect of an axial magnetic field upon the development of the vacuum arc between opening electric contact[J]. IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1993, 16(2): 180-189.
- [22] Taylor E D, Keidar M. Transition mode of the vacuum arc in and axial magnetic field: comparison of experimental results and theory[C]. 23rd International Symposia on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Bucharest, Romania, 2008.
- [23] Beilis I I. Anode spot vacuum arc model: graphite anode[J]. IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies, 2000, 23(2): 334-340.
- [24] Hartmann W, Lawally A, Renzy R, et al. Experimental investigations on cathode spots and dynamical vacuum arc structure in an axial magnetic field[C]. 23rd International Symposia on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Bucharest, Romania, 2008.
- [25] Niwa Y, Sato J, Yokokura K, et al. The effect of contact material on temperature and melting of anode surface in the vacuum interrupter [C]. 21rd International Symposia on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Berlin, 2004.



王立军

收稿日期: 2010-02-05。

作者简介:

王立军(1975), 男, 博士, 副教授, 从事放电等离子体及其应用、直流开断技术方面的研究, lijunwang@mail.xjtu.edu.cn;

王流火(1985), 男, 工学硕士, 从事真空电弧阳极活动特性方向的研究, firehuo.0403@stu.xjtu.edu.cn;

贾申利(1968), 男, 博士, 教授, 从事放电等离子体及其应用、直流开断技术方面的研究, sljia@mail.xjtu.edu.cn;

杨鼎革(1982), 男, 博士研究生, 从事真空电弧及其阳极活动的实验和仿真研究, dinggeyang@sohu.com。

(责任编辑 马晓华)