

纵向磁场和外部横向磁场共同作用下 真空电弧偏移与阳极偏烧现象的仿真研究

黄小龙, 王立军, 贾申利, 王海靖, 胡丽兰, 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)

Simulation Research of Deflection Phenomenon of Vacuum Arc and Anode Erosion Under the Combined Action of Axial Magnetic Field and External Transverse Magnetic Field

HUANG Xiaolong, WANG Lijun, JIA Shenli, WANG Haijing, HU Lilan, SHI Zongqian

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

Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: In the breaking process of vacuum switch, "U" type loop formed by external bus bar and conducting rod will generate a transverse magnetic field (TMF) in interelectrode zone. The existence of TMF has influence on interruption ability of vacuum switch, this article concentrates on the influence and carries on a preliminary simulation research. Based on 2D magnetro-hydrodynamics (MHD) model of vacuum arc and anode melting and solidification model, plasma parameter distribution and anode temperature distribution of high current vacuum arc (HCVA) under combined action of TMF and axial magnetic field (AMF) are obtained. In the simulation results, HCVA under the influence of TMF has an obvious deflection, and plasma parameters have some changes; anode temperature generates the same deflection, and so do anode melting area. Those changes have bad influence on interruption of vacuum switch, especially the rising of ion density will cause the increasing of residual plasma density when the current crosses zero, this will decrease the interruption ability of vacuum switch.

KEY WORDS: vacuum arc, anode, deflection, simulation research

摘要: 在真空开关的开断过程中, 外部母线和导电杆所形成的“U”型回路会在极间电弧区域产生横向磁场(transverse magnetic field, TMF)。横向磁场的存在会影响真空开关的开断性能, 通过仿真对这一影响进行了初步的探索。基于真空电弧二维磁流体动力学模型及阳极熔化凝固模型, 大电流真空电弧(high current vacuum arc, HCVA)在TMF和电极系统自生纵向磁场共同作用下的电弧参数分布及阳极温度分

布得到了揭示。仿真结果中, HCVA在TMF的影响下会产生明显的偏移, 并且各项参数都有所变化; 阳极温度分布也会产生同样的偏移, 最终使得阳极熔化也发生偏移。这些变化会对真空开关的开断产生不利影响, 特别是离子密度的增大使得电流过零时极间残留等离子体增多, 降低开关的开断性能。

关键词: 真空电弧; 阳极; 偏移; 仿真研究

0 引言

真空电弧与一般气体电弧不同, 其放电环境为真空, 因此真空电弧等离子体主要由电极材料烧蚀产生的金属蒸汽及其电离物构成。在真空灭弧室、真空镀膜和脉冲功率等领域真空电弧等离子体都得到了广泛的应用。以往对真空电弧的研究主要采用实验的方法, 随着计算机技术的发展, 建模仿真已成为另外一种行而有效的方法, 可以对电弧等离子体进行微观参数定量研究, 从而更加有效地理解真空电弧。

近年来, 真空断路器向着高电压、大电流的方向发展, 为了提高真空断路器的开断容量, 对真空电弧与电极之间相互作用的研究显得尤为重要。在真空电弧建模与仿真方面, Boxman^[1]、Keidar和Beilis^[2]、Schade和Shmelev^[3-4]、Hauser^[5]、Wenzel^[6]、王立军^[7-10]等研究者都做了大量研究工作, 其中Schade和Shmelev的模型较为全面, Hauser建立了三维瞬态模型, Wenzel考虑了铜铬电极产生的铜和铬原子, 王立军等人研究了不同分布纵向磁场^[11]以及不同开距^[12]对真空电弧的影响, 并在后来对真

基金项目: 国家自然科学基金项目(50907045)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50907045).

空电弧进行了三维建模^[13]。在阳极活动建模与仿真方面, Gellert 和 Egli^[14]建立了一维模型, Niwa^[15]等人考虑了蒸发和质量损失, Schade 和 Shmelev^[16]考虑了阳极蒸汽对电弧的作用, Watanabe^[17]等人得到了阳极表面温度, 王立军等人^[18]则对阳极热过程建立了二维轴对称模型并在后来的研究中考虑了不同纵磁强度的影响^[19]。

以上对真空电弧和阳极活动的研究都主要集中在没有外部横向磁场影响的情况下, 但是在实际的真空断路器开断过程中, 灭弧室外部母线 U 型回路会在电极极间区域产生一个横向磁场(transverse magnetic field, TMF), TMF 的存在使得电弧的形态发生变化, 并在安培力的作用下向一侧偏移, 从而使阳极的烧蚀区域也发生偏移^[20-22], 直接影响着开断过程。不少研究者在实验中都观察到这一现象, 得到了阳极偏烧过后的照片^[20]。王立军等人在仿真中曾考虑了 TMF 对电弧的影响^[23], 但是并没有考虑偏移电弧对阳极烧蚀的影响。

本文首先利用二维磁流体动力学(magneto-hydrodynamics, MHD)模型对 TMF 和电极系统自生纵向磁场(axial magnetic field, AMF)共同作用下的真空电弧进行仿真, 得到注入阳极的能流密度; 然后将电弧仿真得到的能流密度施加到阳极熔化模型上, 最终得到阳极偏烧现象的仿真结果。

1 仿真模型

灭弧室外部连接母线导通电流时, 根据右手定则, 会在极间电弧区域产生指向里面的横向磁场, 如图 1 所示。电弧电流流经此区域时受到指向右侧方向的安培力, 整个电弧会产生偏移。偏移的弧柱携带着能流注入阳极, 使阳极熔化的中心区域偏离电极中心, 最终产生偏烧现象。

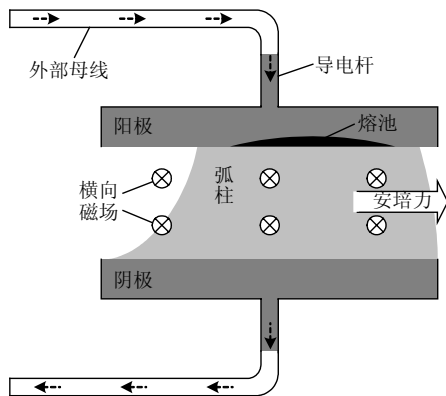


图 1 物理模型
Fig. 1 Physical model

本文首先利用 MHD 模型对真空电弧进行仿真, 将所得能流密度作为边界条件加入到阳极模型中, 经阳极模型仿真最终得到阳极偏烧情况。因此, 在本文的仿真中分别用到了电弧 MHD 和阳极烧蚀两个模型, 所用数学模型及边界条件在文献中^[7-8,18]有详细阐述, 这里不再详述。本文仿真时采用了 3 种不同场强的 TMF 作为对比, 分别是: $B_{TMF}=0$ 、60 和 120 mT。因为外部母线和导电杆是产生 TMF 的主要原因, 因此 3 种不同场强分别代表了不同的外部母线和导电杆的长度搭配关系, 外部母线越长, 导电杆越短, 产生的 TMF 就越强。0 mT 代表去掉 TMF 的影响。其他仿真条件相同: 电弧电流 I 分别为有效值 20 和 28 kA, 触头直径 $d=50$ mm, 开距 $h=10$ mm, 阳极触头片厚度为 4 mm(即阳极仿真区域), 纵向磁场考虑为均匀分布 $B_{AMF}=120$ mT(根据实际触头 3~5 mT/kA 选取), 材料为纯铜。

2 仿真结果与分析

2.1 电弧仿真结果

图 2 为极间电弧等离子体压力分布, 电弧电流

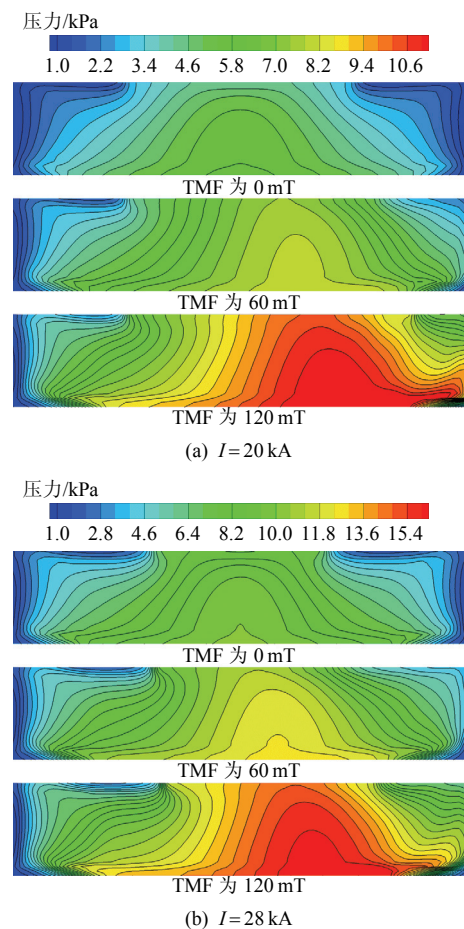


图 2 5ms 时刻电弧等离子体压力
Fig. 2 Plasma pressure at 5ms

I 分别为有效值 20 和 28 kA。

由图 2 可知，在相同 TMF 的情况下，电弧电流越大，极间等离子体压力也越大，但是电弧偏移程度相当。而在电流相同的情况下，随着 TMF 的增大，等离子体压力分布开始出现偏移，并且偏移距离随着 TMF 的增强而增大。不但如此，从图中还可以发现，随着 TMF 的增强，等离子体压力在量值上也有明显的增加。以 $I=28\text{ kA}$ 为例，在没有 TMF 存在时，等离子体压力最大值 $P_{\max}=10\ 105\text{ Pa}$ ；当 TMF 为 60 和 120 mT 时，等离子体压力最大值 P_{\max} 分别增加到了 12 749 和 17 508 Pa。等离子体压力的增大，说明极间等离子体密度或温度有所增大，对真空开关是不利的影响。

极间等离子体离子密度分布如图 3 所示，其分布及特性与压力分布相似。由图 3 可知，离子密度分布同样发生了偏移，而且离子密度在 TMF 为 120 mT 时远大于没有横磁的情况，这使得电流过零时刻极间等离子体残留密度增大，增加了电弧重燃的可能性。离子密度的增大需要电极提供更多的材

料来维持电弧，因此 TMF 为 120 mT 的电极烧蚀比没有横磁的严重，严重的电极烧蚀对电极及真空开关的使用寿命是不利的。仿真过程中我们还发现，电弧的其他等离子参数，如电子温度和轴向电流分布等，都会产生和压力及离子密度类似的变化，其最大值也会随 TMF 的增强而增大，如表 1 所示。

表 1 电弧等离子体参数最大值($I=28\text{ kA}$)

Tab. 1 Maximum value of arc plasma parameters ($I=28\text{ kA}$)

BTMF/mT	离子密度 n_i/m^{-3}	电子温度 T_e/eV	轴向电流密度 $j_z/(\text{A}/\text{m}^2)$
0	19.8×10^{21}	5.17	1.55×10^7
60	24.2×10^{21}	5.18	1.53×10^7
120	31.0×10^{21}	5.49	1.60×10^7

这些参数的增大使得电弧燃烧更为剧烈，特别是电流密度的增大会使阳极的加热更加集中，从而熔化变得更加严重，对真空开断产生不利影响。由表 1 可知， $B_{\text{TMF}}=60\text{ mT}$ 时的电子温度较 $B_{\text{TMF}}=0\text{ mT}$ 时增大较少，而 $B_{\text{TMF}}=120\text{ mT}$ 时的电子温度较 $B_{\text{TMF}}=60\text{ mT}$ 时增大很多。电子温度主要与电流密度的焦耳加热项 j^2/σ 有关(文献[7]中方程 22)，电子温度增加较少可以反映出电流密度增加较少，而电流密度又分为 3 个方向的分量(j_x 、 j_y 和 j_z)，因此电流 j_z 可能变化不大，甚至可能因为数值计算的原因会较 $B_{\text{TMF}}=60\text{ mT}$ 情况时的电流密度略小。

2.2 能流密度

由电弧的仿真结果可以得到注入阳极的能流密度。由文献[24]，注入阳极的能流密度主要与电子温度、鞘层电压和离子速度有关，利用电弧中阳极侧的以上数据可以得到注入阳极的能流密度分布，如图 4 所示。

图 4 中，随着 TMF 的增强，能流密度的偏移量和量值都在增大。能流密度的偏移会使阳极烧蚀最严重的地方偏移阳极中心，具有严重的不对称性；量值的增大则会导致烧蚀变得严重， $B_{\text{TMF}}=120\text{ mT}$ 时的能流密度大约为没有横磁存在的 2 倍，

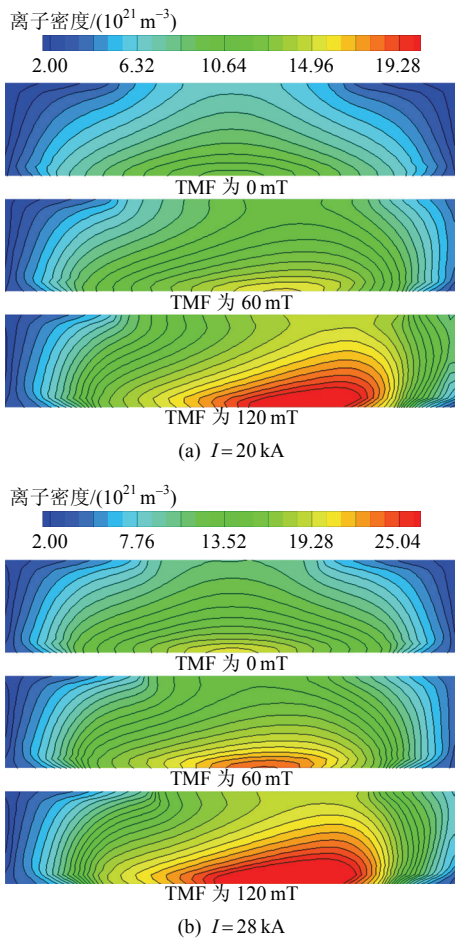
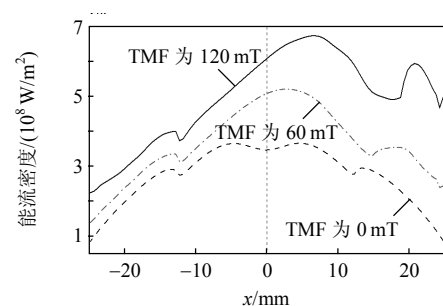


图 3 5 ms 时刻电弧离子密度分布

Fig. 3 Ion density distribution at 5 ms



(a) $I=20\text{ kA}$

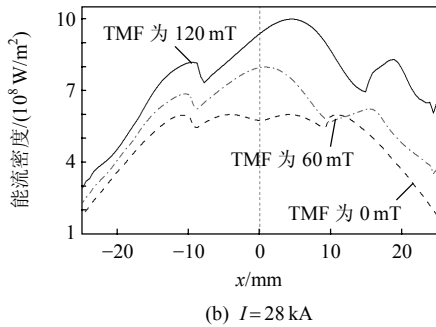


图4 5 ms时刻能流密度
Fig. 4 Energy flux density at 5 ms

因此 $B_{TMF} = 120 \text{ mT}$ 时阳极将受到更严重的烧蚀。烧蚀情况越严重, 阳极材料产生进入弧柱区域的等离子体和金属液滴就越多, 在电流过零时极间等离子体残留物就越多, 真空开关开断失败的可能性就越大, 所以, 要提高真空开关成功开断的可能性, 增大开断容量, 就要从源头上减少外部横磁的影响。

2.3 阳极温度

上文为电弧部分的仿真结果, 将上文所得能流密度以边界条件的形式加入阳极模型中, 对阳极进行仿真, 得到阳极温度分布如图5。为了便于分析, 图5中仅显示2 mm厚度区域。

随着 TMF 的增强, 阳极温度分布出现明显的偏移, 并且不对称性增强。在量值上, 温度有明显

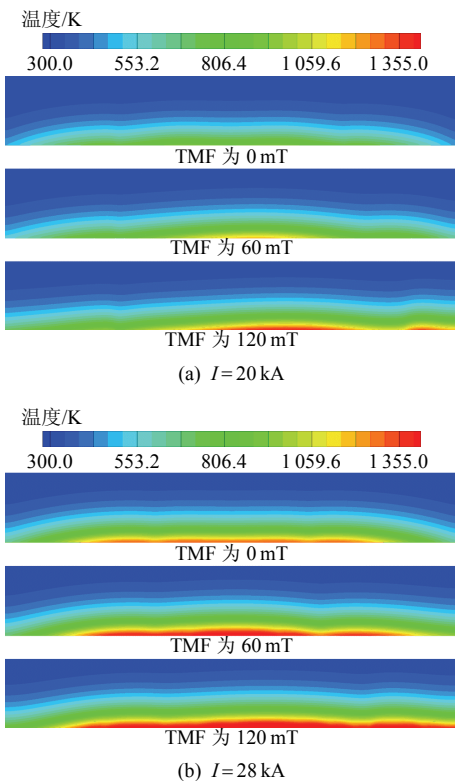


图5 5 ms时刻阳极温度
Fig. 5 Anode temperature at 5 ms

的升高, 较高温度区域有明显的扩大, 以 $I = 28 \text{ kA}$ 为例, 阳极最高温度由不存在 TMF 时的 1290 K 增加到 $B_{TMF} = 120 \text{ mT}$ 时的 2134 K 。在图5中, 图例色条的最高温度线为 1355 K (铜的熔点), 超过此温度线的红色区域表示阳极的熔化区域。由图5可知, 电流同为 28 kA 时, 阳极的熔化深度及范围随着 TMF 的增强有了明显的增大。尤其当 $B_{TMF} = 120 \text{ mT}$ 时, 阳极的熔化区域已经扩展到阳极的边缘, 在极间等离子体压力的冲击下, 阳极边缘的熔化金属会以蒸汽和液滴的方式进入灭弧室, 严重影响真空开关的开断能力。

图6为阳极表面产生的铜蒸汽通量分布。蒸汽通量为温度的函数, 其值直接由温度决定, 因此铜蒸汽密度较大的地方也是温度较高的位置, 比较图5和图6可以较容易看出这种关系。

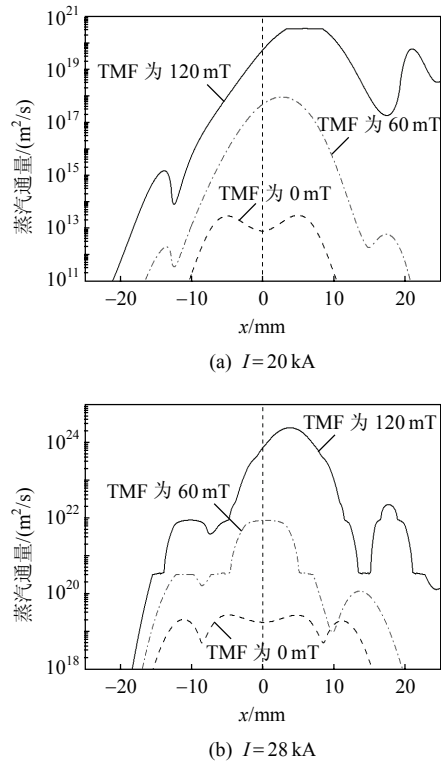


图6 5 ms时刻阳极蒸汽通量
Fig. 6 Anode vapor flux at 5 ms

由图6(a)、6(b)可知, 对于同样的横磁情况, 电流有效值增大 8 kA 会使得阳极产生的蒸汽增加5个数量级左右; 对于同样的电流情况, 横磁每增强 60 mT , 阳极产生的蒸汽会增加2~3个数量级。阳极蒸汽通量的过分增大意味着阳极不再是被动的离子接收器, 而是成为极间等离子体的重要来源, 其作用越来越不可忽略, 它会增加极间等离子体密度和电流过零时刻的等离子体残留, 引起开断失败。

3 讨论

灭弧室外部母线 U 型回路在极间区域会产生一个横向磁场(磁场的大小与外部母线的布置方式有关,如导电杆和外部导线的长度关系),在这个磁场的影响下电弧燃烧开始出现不稳定,最终使阳极产生偏烧。这种偏烧带来的结果不仅使阳极的烧蚀区域偏移电极中心(甚至出现在阳极边缘),而且使阳极的烧蚀变得更加严重,增加极间等离子体密度,不利于真空开关的开断。实际中,这种现象是存在的。为了提高真空开关的开断能力,有必要对外部母线产生的横向磁场进行削弱,可行的办法有:采用较长导电杆和磁屏蔽等。

本文对电弧的偏移和电极的偏烧进行了初步探索,得到了外部横磁对电弧及电极特性的影响。然而,由于模型的限制,本文仍有许多亟待改进的地方,如阳极熔化后产生的大量铜蒸汽对电弧的影响以及三相电流中其他两相的影响等在本文仿真中都没有考虑,后续的研究将会对模型进行不断改进,使之更为完善。

4 结论

1) 外部母线产生的横向磁场使电弧在安培力的作用下偏离电极中心,电弧的各种分布参数(如压力、离子密度等)出现明显的偏移。

2) 电弧的偏移使得注入阳极的能流密度分布也出现同样的偏移,而且在量值上也有很大的增加(最大值已达到近 2 倍)。

3) 阳极温度由注入阳极的能流密度决定,因此阳极温度也产生了明显的偏移,而且随着横向磁场的增大,阳极的熔化区域已经扩展到阳极边缘,这将增大真空开关开断失败的概率。为了减小外部磁场的影响,有必要采取一些屏蔽手段。

参考文献

- [1] Boxman R L. Magnetic constriction effects in high-current vacuum arcs prior to the release of anode vapor[J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, 48(6): 2338-2345.
- [2] Beilis I I, Keidar M, Boxman R L, et al. Theoretical study of plasma expansion in a magnetic field in a disk anode vacuum arc[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(2): 709-717.
- [3] Schade E, Shmelev D L. Numerical simulation of high-current vacuum arcs with an external axial magnetic field[J]. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2003, 31(5): 890-901.
- [4] Schade E, Shmelev D L. Numerical modeling of high current vacuum arcs in external axial magnetic fields taking into account essential anode evaporation[C]// *Proceedings of the 21st International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Yalta, Crimea: Tavrida Electric, 2004: 411-414.
- [5] Hauser A, Hartmann W, Lawall A, et al. Development of a FEM Simulation of Axial Magnetic Field Vacuum Arcs[C]// *Proceedings of the 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Bucharest, Rumania: University "POLITEHNICA" of Bucharest, 2008: 398-401.
- [6] Wenzel N, Kosse S, Lawall A, et al. Numerical simulation of multi-component arcs in high-current vacuum interrupters[C]// *Proceedings of the 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Tomsk, Russia: Institute of High-Current Electronics Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2012: 321-324.
- [7] 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).
- [8] 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. Magnet hydro dynamic model and simulation of high-current vacuum arc[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(22): 174-180(in Chinese).
- [9] Wang L, Qian Z, Jia S, et al. 3D time-dependent model and simulation of high-current vacuum arc in commercial axial magnetic fields vacuum interrupters[C]// *Proceedings of the 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Tomsk, Russia: Institute of High-Current Electronics Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2012: 388-391.
- [10] Wang L, Zhang L, Hu L, et al. Transient modeling and simulation of high current vacuum arc under different conditions[C]// *Proceedings of the 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Tomsk, Russia: Institute of High-Current Electronics Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2012: 329-332.
- [11] Wang L, Jia S, Shi Z, et al. Numerical simulation of vacuum arc under different axial magnetic fields[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38:

- 1034-1041.
- [12] 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).
- [13] Wang L, Jia S, Zhou X, et al. Three-dimensional model and simulation of vacuum arcs under axial magnetic fields[J]. Physics of Plasmas, 2012, 19: 013507.
- [14] Gellert B, Egli W. Melting of copper by an intense and pulsed heat source[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1988, 21(12): 1721-1726.
- [15] 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]//Proceedings of the 19th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2000: 524-527.
- [16] Schade E, Shmelev D, Kleberg I. Numerical modeling of the heat flux to the anode of high-current vacuum arcs[C]//Proceedings of the 20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tours, France: EIT, 2002: 518-525.
- [17] Watanabe K, Sato J, Kagenaga K, et al. The anode surface temperature of CuCr contacts at the limit of current interruption[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1997, 25(4): 637-641.
- [18] Wang L, Jia S, Yang D, et al. Modeling and simulation of anode activity in high-current vacuum arc[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(14): 13.
- [19] 王立军, 贾申利, 陈斌, 等. 不同纵向磁场对大电流真空电弧中阳极活动影响的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 131-137.
Wang Lijun, Jia Shenli, Chen Bin, et al. Simulation researches on influence of different axial magnetic fields on anode activity in high-current vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 131-137(in Chinese).
- [20] 贾申利, 闫静, 付军, 等. 一种用于真空灭弧室的磁屏蔽罩[J]. 高压电器, 1999(2): 13-16.
Jia Shenli, Yan Jing, Fu Jun, et al. A magnetic shield for vacuum chamber[J]. High Voltage Apparatus, 1999(2): 13-16(in Chinese).
- [21] Yao X, Wang J, Geng Y, et al. An influence of an ambient magnetic field induced by a nearby parallel conductor on high-current vacuum arcs[C]//Proceedings of the 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tomsk, Russia: Institute of High-Current Electronics Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2012: 337-340.
- [22] Poluyanov I, Bugayov V. Interruption capability of the amf electrodes in the external transverse field[C]//Proceedings of the 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tomsk, Russia: Institute of High-Current Electronics Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2012: 244-247.
- [23] Wang L, Jia S, Liu K, et al. Numerical simulation of high-current vacuum arc characteristics under combined action of axial magnetic field and external magnetic field from bus barp[J]. Physics of Plasmas, 2009, 16(10): 103502.
- [24] Boxman R L, Goldsmith S. Model of the anode region in a uniform multi-cathode-spot vacuum arc[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(2): 592-602.



黄小龙

收稿日期: 2013-06-12。

作者简介:

黄小龙(1988), 男, 博士生, 从事真空电弧非对称效应的建模仿真研究, huangxiaolong0705@163.com;

王立军(1975), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 从事电弧等离子体理论及其应用方面的研究, lijunwang@mail.xjtu.edu.cn。

(编辑 胡琳琳)