



·脉冲功率技术·

## 强流脉冲电弧作用下石墨电极蒸发特性\*

戴宏宇, 郭景润, 俞斌, 沈昊, 李黎

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 武汉 430074)

**摘 要:** 气体开关电弧的热侵蚀作用是电极损耗的主要成因。石墨电极在电弧作用下发生蒸发并在多次放电后有明显的质量损耗, 改变了开关内的气体环境和电极间距, 导致开关动作可靠性降低。为研究石墨电极在脉冲电弧冲击下的侵蚀特征, 基于开关电弧瞬态扩散特征和石墨材料参数, 在弧根区域建立了电弧-电极能量耦合模型, 得到了等离子体-固体区域的传热特性。考虑石墨电极的相变特征, 计算瞬态热作用下石墨电极的加热范围以及临界相变点, 研究瞬态电弧热冲击作用下的石墨电极相变机制。研究结果表明, 电弧-电极界面热流主要集中在电弧接触面中心, 电弧沉积的能量密度最高可达  $10^9 \text{ W/m}^2$ , 石墨在电流上升初期基本处于加热状态, 在能量积聚作用下, 石墨转变为升华状态, 传热强度随半径急剧衰减, 蒸发区域略小于电弧半径。通过实验记录了 5 种开关工况下石墨电极烧蚀形貌和质量损失情况, 结果表明, 电极质量损失与电弧沉积在电极表面的能量线性相关, 近似为  $0.015 \text{ mg/J}$ 。研究了电弧关键参数对电极质量损失速率的影响, 为延缓电极损耗提供数据支撑。

**关键词:** 脉冲放电; 气体开关; 石墨电极; 开关电弧; 电极烧蚀

中图分类号: TM833

文献标志码: A doi: [10.11884/HPLPB202234.220002](https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.220002)

## Effect of high-current pulsed arc on the evaporation characteristics of graphite electrode

Dai Hongyu, Guo Jingrun, Yu Bin, Shen Hao, Li Li

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The thermal erosion of arc is the main cause of electrode loss in the spark gap switch. The graphite electrode will evaporate and constantly undergo mass loss under the effect of the arc, which changes the gas environment in switch and the electrode distance, resulting in decreased reliability of the switch operation. To obtain erosion characteristics of graphite electrode under high-current pulse arc, the energy coupling model between the switching arc and graphite electrode is established based on the switching arc transient diffusion characteristics and graphite material parameters, and the heat transfer characteristics of plasma-solid region is obtained. Considering the phase change characteristics of graphite electrode, the heating range and critical phase change point of graphite electrode under transient thermal effect is calculated, and the phase change mechanism of graphite electrode under transient thermal shock of the arc is studied. The study results indicate that the heat flux of the arc-electrode interface is mainly concentrated in the center of the arc contact surface, and the energy density of arc deposition can reach up to  $10^9 \text{ W/m}^2$ . Graphite is basically in a heating state at the beginning of the current rise, under the effect of energy accumulation, the graphite transforms into sublimation state. The heat transfer intensity decreases sharply with the radius decreasing, and the evaporation radius is slightly smaller than the arc radius. The ablation morphology and mass loss of graphite electrode under five different switching conditions were recorded through experiments. The experimental results show that the electrode mass loss is linearly related to the energy deposited on the electrode surface by the arc, approximately  $0.015 \text{ mg/J}$ . This paper studies the influence of arc key parameters on electrode mass-loss rate, and provides a theoretical and experimental basis for slowing electrode loss.

**Key words:** pulse discharge, spark-gap switch, graphite electrode, switching arc, electrode erosion

\* 收稿日期: 2022-01-04; 修订日期: 2022-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51777082, 52077091)

联系方式: 戴宏宇, [daihongyu66@hust.edu.cn](mailto:daihongyu66@hust.edu.cn)。

通信作者: 李黎, [leeli@hust.edu.cn](mailto:leeli@hust.edu.cn)。

气体开关是脉冲功率装置一种典型的强流闭合开关,可满足脉冲功率电源对高电压、高峰值电流、高电流上升率的极端参数需求,如激光惯性约束聚变装置采用了气体开关作为氙灯放电主电路的能量控制器件<sup>[1]</sup>。气体开关通过电极之间电离空气产生的电弧转移能量,由于开关的电流幅值一般在 kA 级以上,此时的开关电弧温度高达数万 K,且电弧根部直接与电极接触,导致电极表面破坏<sup>[2]</sup>。电极烧蚀问题是此类开关的研究热点<sup>[3-4]</sup>。

电极是开关中能量汇聚和传导的关键部件,不同电极材料具有差异较大的物理特征,如熔点、比热容、导热系数等,材料的选取对电极使用寿命有较大的影响,Ida 的理论计算表明石墨具有较高的熔点和比热容,其抗烧蚀能力远高于铜、钨等常用电极材料<sup>[5]</sup>; Donaldson 的实验也证实了大电流放电条件下,石墨的烧蚀速率低于铜、钨铜等材料<sup>[6]</sup>。金属材料在加热过程需要经历首先固相向液相的转变,材料表面形成熔池,在高温作用下熔池的表面张力、粘性流动、热稳定性等参数发生变化;然后发生液相向气相的转变,金属在电弧作用下发生喷溅进入等离子体弧区,因此放电后开关腔体中有固体金属颗粒的存在<sup>[7]</sup>。石墨材料的优势在于该材料在开关运行时不会以液相形式存在,也不会以熔融飞溅的形式逃逸电极表面,放电之后的电极表面较为平整,不存在毛刺状突起,放电之后的电极间电场均匀性更好。目前,电极物质的逃逸机制有一定的研究基础,根据燃弧条件和放电体结构的差异<sup>[8]</sup>,各种模型的适用范围有所差异,其中能量通量法<sup>[9]</sup>和蒸气压法<sup>[10]</sup>可用于蒸发速率较快的场景。

已在工程上广泛应用的大电流开关在放电 6000~8000 次后需要更换石墨电极,若电极未及时更换会出现自闪概率增加、触发稳定性降低等故障。更换电极后,开关需要进行拉杆稳固性测试、气密性核验等,以确保开关的可靠性。由于电极的相变特征较为特殊,石墨损耗机制还少有关关注。本研究旨在揭示开关腔体中的石墨电极蒸发机制,探寻影响电极烧蚀的关键因素,为延缓电极损耗提供可行的参考途径。

## 1 实验平台与仿真模型

石墨电极在开关中的安装位置如图 1 所示,阴极和阳极形状完全一致,电极间隙距离固定为 8 mm。开关采用过电压触发方式,通过流注形成的放电通道作为电弧初始扩散区域。电弧不受到外加电场或磁场的约束,其膨胀状态由电流大小和变化速率决定。

### 1.1 开关电弧热力学模型

开关电弧是一种典型的带电流体,以流体场为基础建立磁流体动力学模型,考虑弧柱中电流感应磁场对电弧扩散状态的影响,建立开关燃弧区域的电弧温度场模型,假设电弧处于局部热力学平衡状态,不考虑电弧边界和鞘层的非平衡效应。在脉冲条件下,不考虑电极升华的石墨对放电气体物性参数的影响。假设电极的升华物全部进入气体区域,在电弧的燃弧时间内不重新凝华,不考虑电弧区域中化学反应消耗或释放的能量,采用磁流体动力学(MHD)模型描述电弧的演变特征<sup>[11]</sup>,在模型中还原开关的实际尺寸,如图 2 所示,边界条件的设定如表 1 所示,设定电极和气体区域的初始温度为 1000 K<sup>[12]</sup>,腔体内的气压为 0.23 MPa,阳极上的电势 $\varphi=0$ ,阴极电势由电流密度 $j$ 决定,模型边界各处的磁矢位的导数为 0。放电气体的电导率、热导率、比热容、密度、粘度等物性参数和热力学参数基础数据已得到整理<sup>[11]</sup>。

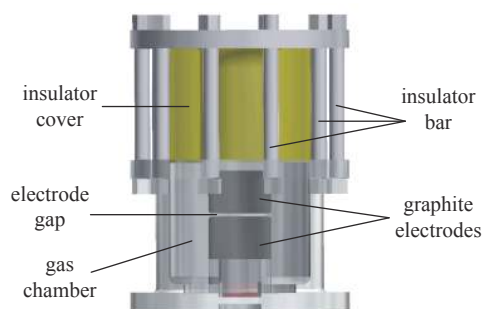


Fig. 1 Schematic diagram of graphite electrode position in spark gap switch

图 1 气体开关中石墨电极位置示意图



Fig. 2 Computational region of MHD model

图 2 磁流体动力学模型计算区域

### 1.2 电弧-电极界面热流计算

开关中电弧温度远高于电极温度,电弧和电极之间存在强烈的热传导,电弧高温作用到电极上使电极发生相变。电弧和电极之间存在动态的能量平衡关系,电弧的热传导和电子、离子的发射、撞击作用和电极上的焦耳发热和辐射散热存在平衡,同时有部分能量使石墨发生相变,表面石墨以升华的形式离开电极。

表 1 计算模型边界条件的设置  
Table 1 Setting of boundary conditions of MHD model

boundary	type	temperature/K	electric potential	magnetic potential
<i>AB, EF</i>	wall	1000	$\partial\varphi/\partial n = 0$	$\partial A/\partial n = 0$
<i>BC, DE, FG, HA</i>	wall	1000	$\partial\varphi/\partial n = 0$	$\partial A/\partial n = 0$
<i>CD</i>	wall (cathode)	1000	$j = -\sigma\partial\varphi/\partial n$	$\partial A/\partial n = 0$
<i>GH</i>	wall (anode)	1000	$\varphi = 0$	$\partial A/\partial n = 0$

电弧区域附近, 阴极表面的热流源于电弧的热传导作用、辐射作用和离子撞击作用, 同时, 电子发射和电极的热辐射会冷却电极。以电极表面为界面, 规定进入电极的能量为正, 从电极上耗散的能量为负, 阴极热流  $S_{\text{cathode}}$  可表示为<sup>[13]</sup>

$$S_{\text{cathode}} = -\varepsilon\alpha T^4 - j_e\varphi_g + |j_i|V_i + k\frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon\alpha T^4$  为电极的热辐射作用;  $\varepsilon$  为石墨材料的辐射发射系数;  $\alpha$  为 Stefan-Boltzmann 常数;  $\varphi_g$  为石墨的功函数。

电弧辐射对电极的能量传递作用远小于接触区域的热传导作用和离子撞击作用<sup>[14]</sup>, 此模型不考虑辐射加热的影响。电弧传导的总电流密度是电子电流和离子电流之和, 即  $|j| = |j_i| + |j_e|$ , 电子电流  $j_e$  与阴极材料有关, 电子源于材料的热电子发射作用, 可用 Richardson–Dushman 表达式计算

$$j_e = AT^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_g}{k_B T}\right) \quad (2)$$

式中:  $A$  为 Richardson 常数;  $k_B$  为玻耳兹曼常数;  $T$  为温度。

电子的发射强度主要与温度有关, 阳极热流  $S_{\text{anode}}$  主要考虑电子的撞击发热作用, 同时考虑电弧和电极区域的辐射作用

$$S_{\text{anode}} = j_e\varphi_g + k\frac{\partial T}{\partial z} - \varepsilon\alpha T^4 \quad (3)$$

### 1.3 石墨材料蒸发烧蚀模型

电极蒸气存在从电极到电弧空间的输运过程, 电极蒸气的转移满足质量守恒定律。电极蒸气的质量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial(\rho Y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y) = \nabla \cdot (\rho D_{\text{graphite}} \nabla Y) + S_g \quad (4)$$

式中:  $Y$  为石墨蒸气混合的气体中石墨的质量分数;  $D_{\text{graphite}}$  为石墨蒸气在气体空间中的扩散系数。

质量源项  $S_g$  与石墨蒸气质量通量  $J_{\text{evp}}$  有关,  $J_{\text{evp}}$  可根据 Hertz–Knudsen–Langmuir 方程得到, 主要与计算区域的蒸气压力相关, 取蒸发系数  $\sigma = 18/25$ , 采用如下近似表达式<sup>[15]</sup>

$$S_g = J_{\text{evp}} \times \Delta A_{\text{evp}} / \Delta V_{\text{evp}} \quad (5)$$

$$J_{\text{evp}} = \sqrt{\frac{m_{\text{graphite}}}{2\pi k_B T}} \left( \frac{16\sigma}{16-7\sigma} \right) \times p_{\text{wall}} \left( \frac{p_{\text{wall}} - p_{\text{switch}}}{p_{\text{wall}}} \right) \quad (6)$$

式中:  $m_{\text{graphite}}$  为石墨材料的相对分子质量; 设定远离电极的压强  $p_{\text{switch}}$  为开关工作气压; 电极表面附近压强  $p_{\text{wall}}$  用 Clausius–Clapeyron 方程描述

$$p_{\text{wall}} = p_{\text{switch}} \exp\left[ \frac{-H_{\text{evp}}}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{evp,graphite}}} - \frac{1}{T_{\text{surface}}} \right) \right] \quad (7)$$

式中:  $H_{\text{evp}}$  为石墨蒸发的分子热;  $T_{\text{evp,graphite}}$  为石墨升华温度;  $T_{\text{surface}}$  取磁流体动力学模型结果中的近电极处温度。

## 2 实验研究

在脉冲功率电源实验平台上完成石墨电极烧蚀实验, 实验平台包括电容器储能模块、电感器调波模块和模拟负载模块, 通过控制电容、电感、电阻参数调控放电电流波形。为模拟气体开关的常用工况, 电流脉宽设定为 2~3 ms, 设定 5 种不同的放电条件, 实测的电流波形如图 3 所示。使用石墨电极气体开关原型机, 石墨电极采用 POCO 公司 AFM-5 原料制成。电极表面经砂纸打磨至光滑, 2 个形状完全一样的电极固定在开关密封腔体中。在

5种不同的电流波形下,重复放电多次,使用高精度电子天平测定电极的质量损失值,记录不同条件下石墨电极的质量差值。在单次和多次放电条件下,对电极烧蚀形貌进行微观观测,分析石墨蒸发特征及电极的质量损失规律。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 电极表面能量分析

将开关电流作为电弧仿真模型的边界条件。由于开关采用过电压触发方式,短脉冲高压产生初始放电通道,设定初始通道半径为0.1 mm,设定初始导电通道温度为10 000 K。在脉冲电流输入时刻,电弧从中心位置开始膨胀,电极的烧蚀主要受电弧扩散的影响,电极热侵蚀表面积随电弧电流的增加而扩大。

模型计算结果如图4所示,在起始时刻,电弧通道径向扩散,电弧中心温度迅速上升,放电区域的边界温度低于中心温度。随电流的增加,弧柱通道的扩散模式由均匀扩散转变为弧柱中部膨胀快、近电极区膨胀慢特征。由于近电极区域的电流密度大,电弧辐射强度高,电弧靠近电极处的温度较高,受热传导的影响,电弧区域快速扩散。随电流的增加,电弧通道以中心部位的径向扩散为主,因此放电区域由近圆柱状演变为近椭球状。

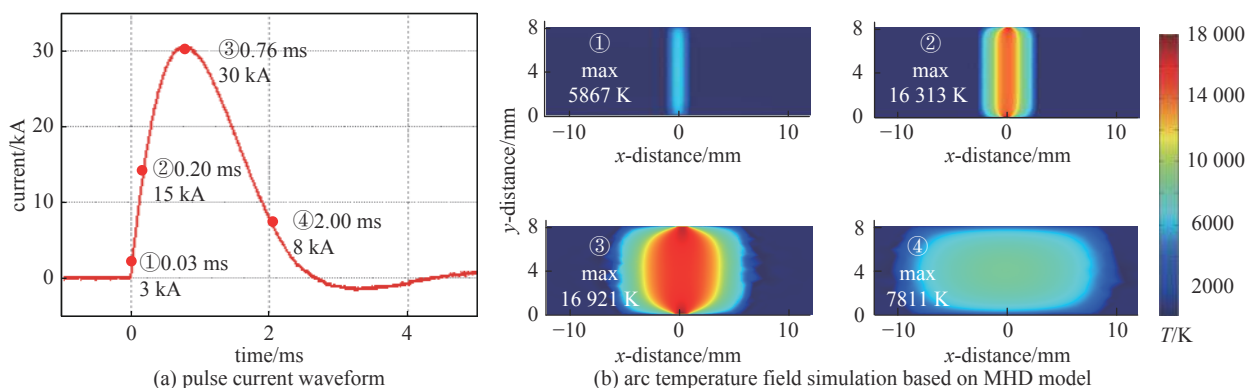


Fig. 4 Model calculation results

图4 模型计算结果

电弧热传导是电极表面热流的主要来源,电子和离子的迁移运动也给电极表面的能量带来了较大影响。尽管阴极表面有电子发射的冷却作用,离子的撞击带来的能量增益超过了电子的发射冷却强度,阴极表面的热流强度远高于阳极表面,如图5所示。特别是在0.76 ms电流最大的时刻,受到洛伦兹力的影响,电流主要集中在中心部位,电弧的最高温度接近17 000 K,电极中心的热流强度达到 $10^9$  W/m<sup>2</sup>,远高于边界部位。在脉冲电流的下降时刻,电弧通道的电流减小,但通过电弧的总能量增加,电离气体继续扩散,弧柱整体温度降低至7000~8000 K,此时电极表面的能量交换以热传导作用为主。

将各时刻电极表面的热流进行积分得到电极的表面能量,如图6所示。结果表明,30 kA/2.3 ms的脉冲电弧下,电极热传导主要集中在3 mm以内的区域,直到12 mm处都受到电弧能量较大的影响。相比之下,阴极表面积累的能量高于阳极,理论上阴极受到电弧的热破坏作用更强。

通过电极界面处的热耦合分析,得到了不同放电时刻石墨电极中的温度分布。图7给出了阳极温度的计算结果,受到电弧的热冲击作用和电子碰撞的影响,石墨电极在放电初期即达到相变温度<sup>[6]</sup>,特别是在电极与电弧接触的中心区域,电弧温度与电极温度同步上升,从初始温度到相变温度仅需要数 $\mu$ s,具体时间随放电条件的变化有一定差异。

随放电电流的增大,更大体积的区域发展到相变临界点。在径向上,随电弧半径的扩大,电极的热冲击面积扩大,温升半径从2 mm增加到8 mm;在轴向上,受到电弧持续的能量输入,电弧的表面局部区域的温度持续上升,但大部分区域不受电弧热流的影响。基于界面能量平衡理论,从电弧侧输入到电极的能量用于电极发热和升华,电

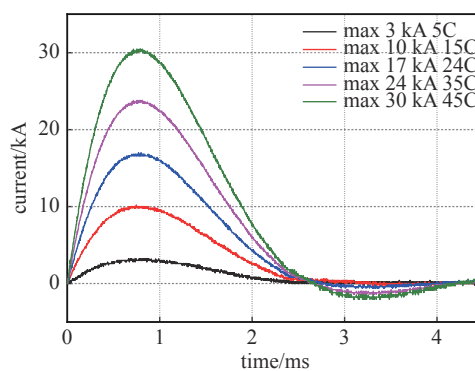


Fig. 3 Five typical switching pulse discharge current waveforms

图3 5种典型的开关脉冲放电电流波形



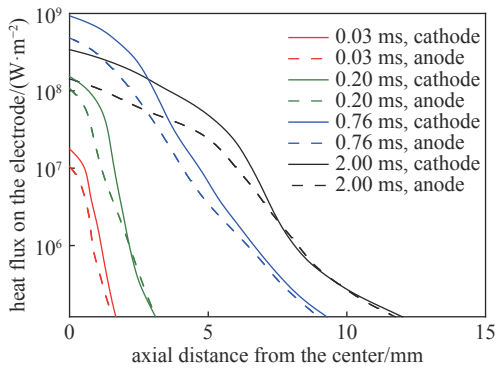


Fig. 5 Calculation of heat flux on cathode and anode surface

图5 阴极和阳极表面热流计算

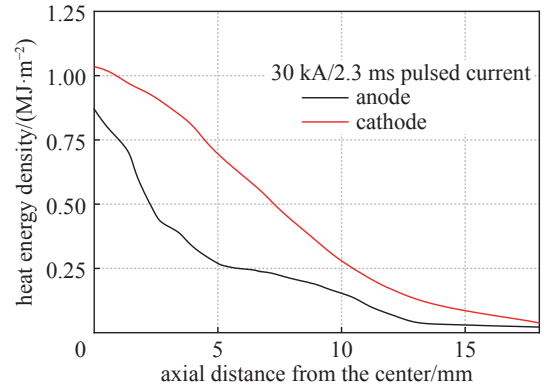
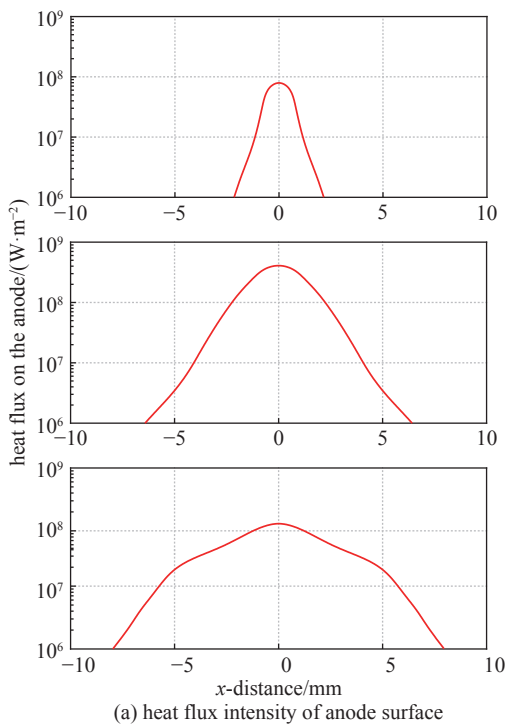
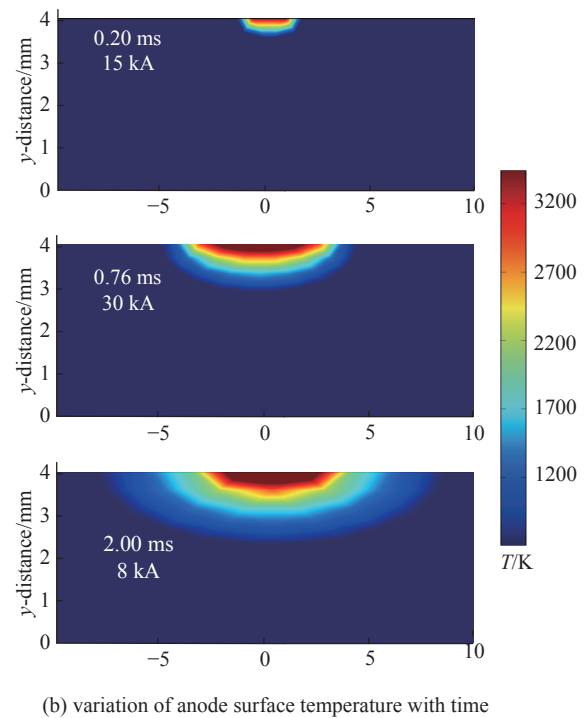


Fig. 6 Heat energy distribution of cathode and anode

图6 阴极和阳极的表面能量分布



(a) heat flux intensity of anode surface



(b) variation of anode surface temperature with time

Fig. 7 Calculation results of anode temperature

图7 阳极温度的计算结果

极表面吸收的能量一部分在热传导的作用下加热更深处电极,一旦电极局部吸收的能量达到升华的临界点,石墨迅速转变为蒸气。石墨从固态到气态是典型的吸热过程,相变过程中能够带走累积在石墨电极表面的热量,有效阻止电弧能量向更深处传导,保护电极表面。

### 3.2 石墨电极烧蚀特征分析

对实验中的石墨电极烧蚀特征进行分析,电弧烧蚀部位具有一定随机性,3次放电分别烧蚀3次不同位置。从宏观上看,阳极的烧蚀较为规则,3次的烧蚀痕迹尺寸基本一致,而阴极的烧蚀边缘位置出现了发散状斑点,可能是气流的原因造成的,在开关中阴极位于阳极的正上方,电弧加热的高温气流会对上方电极有较大的影响。烧蚀区域和非烧蚀区域的粗糙度存在较大差异,阴极的烧蚀区域边缘存在深色轮廓,烧蚀部位的粗糙度也明显高于未烧蚀部位,如图8(a)所示,阳极颜色较深的部分为烧蚀区域,阴极烧蚀部位粗糙度高于阳极烧蚀区域,图8(b)中标出了3次放电的烧蚀部位,阳极烧蚀半径在12.2~14.1 mm,阴极的烧蚀面积略大于阳极。

石墨蒸气的产生与电弧强度有关,蒸气集中产生在电极中心区域,蒸气浓度随半径减弱。如图9所示,在0.03 ms的放电时刻,电弧对电极的热传导功率较低,蒸发区域仅在中心1 mm范围内,且石墨蒸气在气体中的浓度仅为0.5%。石墨的蒸发速率和蒸发半径随电流的增加逐步上升,在电流峰值时刻电极表面处石墨的质量分数超过4%,参与蒸发的电极半径也增加到约10 mm。在电流的下降阶段,电弧对电极传导的能量强度减小,石墨的蒸发速率

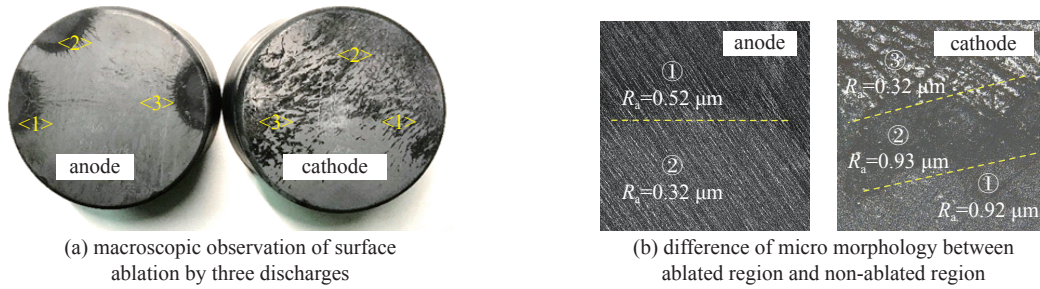


Fig. 8 Macro and micro photos of graphite electrode surface ablation

图 8 石墨电极表面烧蚀宏观与微观照片

也相应减小,但是由于电极表面在长脉宽电流电弧的传热作用下已经处于升华温度附近,一旦电极界面上有面向电极方向的能量激励,石墨立即转变为升华状态,电极蒸发量随时间的变化如图 10 所示。

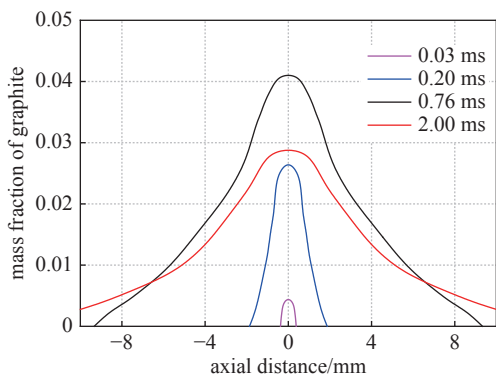


Fig. 9 Mass fraction of graphite vapor on anode surface with time

图 9 不同放电时刻阳极表面石墨蒸气浓度

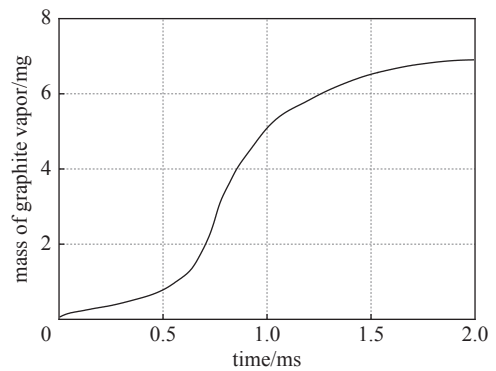


Fig. 10 Variation of evaporation quality of graphite with time

图 10 石墨电极蒸发质量随时间的变化

石墨的质量损失是蒸发作用的累积效应,单次放电电极的质量损失仅在 mg 量级,电子天平在此范围内难以准确测量,因此电极的质量损失在每 100 次放电后进行测定。在不同的放电条件下,电极的质量损失速率差异明显,总质量损失大致与转移电荷量成正比,在氮气背景气体中石墨电极的总质量损失速率为 0.153 mg/C。对电极表面的热流功率进行积分,获得电弧的沉积能量,电弧对电极传导能量的关系可以表示为 0.015 mg/J,通过能量沉积的观点可以解释早期研究发现的开关在不同气体条件下电极的质量损失有较大差异<sup>[8]</sup>,特别是电弧热值较低的氩气作为背景气体,电极的质量损失能降低 62.7%。图 11 记录了 5 种不同放电条件下阴极和阳极的质量损失,其中阴极的平均质量损失占到总质量损失的 58%,在热传导近乎一致的条件,开关放电条件下阴极离子撞击提供的能量强于阳极的电子热作用,导致阴极的热流强度更高,电极损失速率也更快。实验测定的电极质量损失与理论计算存在差异,主要考虑两种原因,一是石墨电极烧蚀后热冲击区域表面基群被破坏,石墨颗粒的粘附力不如未烧蚀

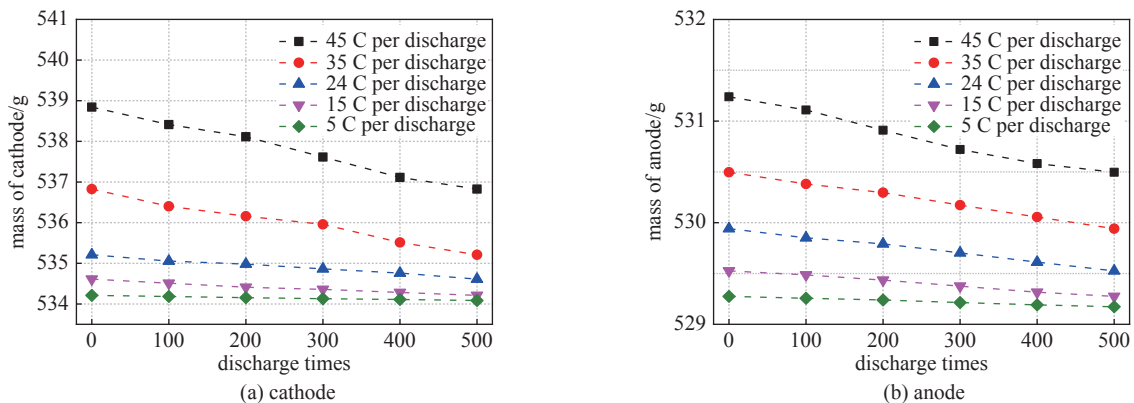


Fig. 11 Variation of cathode and anode mass with discharge times

图 11 阴极和阳极质量随放电次数的变化

区域,在电弧的力学冲击作用下会直接脱落;二是燃弧位置在电极边缘和电极中心对热流分布有一定影响,造成石墨损失质量的评估数据波动。

## 4 结 论

建立了脉冲放电条件下的电弧磁流体动力学模型,研究了电弧冲击下石墨电极表面的瞬态热力学响应,以 30 kA/2.3 ms 典型的脉冲放电电流波形计算了电弧温度场变化特征、电极表面热流强度、电极-电弧界面能量特征,得到了脉冲放电各时刻的石墨电极表面温度分布及蒸发特性,并通过实验验证并总结了石墨电极的质量损失特征。

(1)基于磁流体动力学计算方法对开关电弧的扩散特性有较高的模拟精度,在 30 kA/2.3 ms 的脉冲电流条件下,电弧根部烧蚀半径约 10 mm,与仿真结果基本吻合。脉冲电流激励条件下的弧区动态变化较为复杂,难以找到数值上的线性关系,采用多物理场仿真软件进行瞬态求解是较为可靠的方法。

(2)石墨的烧蚀主要是由电极表面的热力学累积效应造成的,脉冲放电过程中电极表面的热流强度先增加后减小,但电极从电弧吸收的能量不断增加,随着电弧半径的扩大,电极的温升区域不断增大,当电极温度达到相变临界点时石墨以蒸发的形式逃逸电极表面,弧根中心部位的蒸发量明显高于边缘区域。在脉冲电流的下降沿,由于弧根处电极温度已处于相变临界温度,尽管此阶段的电弧根部热流减小,但电极仍有蒸发增量。

(3)石墨电极的蒸发速率主要受电极温度状态及电弧根部瞬时热流强度的影响,此理论可以用来解释不同放电气氛中电极烧蚀速率存在区别的原因。在  $N_2$  背景气体环境中,石墨的逃逸速率与电弧能量沉积的关系为 0.015 mg/J。

## 参考文献:

- [1] 何伟,李黎,郑万国,等. 2.0 MJ脉冲功率源的500 kA气体开关系统[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(5): 1293-1297. (He Wei, Li Li, Zheng Wanguo, et al. 500 kA switch-trigger system for 2.0 MJ capacitive pulsed power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(5): 1293-1297)
- [2] Donaldson A L, Hagler M O, Kristiansen M, et al. Electrode erosion phenomena in a high-energy pulsed discharge[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1984, 12(1): 28-38.
- [3] 罗城,丛培天,张天洋,等. 气体火花开关电极烧蚀研究综述[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 105001. (Luo Cheng, Cong Peitian, Zhang Tianyang, et al. Review of the research on electrode erosion of gas spark switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 105001)
- [4] 刘轩东,沈曦,李晓昂,等. 脉冲作用下气体火花开关电极熔蚀研究[J]. *高电压技术*, 2017, 43(9): 3070-3077. (Liu Xuandong, Shen Xi, Li Xiao'ang, et al. Researches on electrode erosion of gas spark switch under pulsed current[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(9): 3070-3077)
- [5] 饭田修一,大野和郎,神前熙,等. 物理学常用数表[M]. 北京: 科学出版社, 1979. (Ida S, Ono K, Kozaki H. Data on physics in common use[M]. Beijing: Science Press, 1979)
- [6] Donaldson A, Kristiansen M, Watson A, et al. Electrode erosion in high current, high energy transient arcs[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1986, 22(6): 1441-1447.
- [7] Li Xiao'ang, Liu Xuandong, Zeng Fanhui, et al. Ejection of electrode molten droplet and its effect on the degradation of insulator in gas spark switches[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(4): 1049-1053.
- [8] Xiang Junting, Tanaka K, Chen F F, et al. Modelling and measurements of gas tungsten arc welding in argon-helium mixtures with metal vapour[J]. *Welding in the World*, 2021, 65(4): 767-783.
- [9] Nielsen T, Kaddani A, Zahrai S. Modelling evaporating metal droplets in ablation controlled electric arcs[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, 34(13): 2022-2031.
- [10] Murphy A B. The effects of metal vapour in arc welding[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43: 434001.
- [11] 戴宏宇,沈昊,李黎. 石墨电极气体开关中等离子体弧区碳氧反应效率研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 065015. (Dai Hongyu, Shen Hao, Li Li. Research on plasma arc oxidation efficiency of spark gap switch with graphite electrodes[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 065015)
- [12] McKelliget J, Szekely J. Heat transfer and fluid flow in the welding arc[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1986, 17(7): 1139-1148.
- [13] Lowke J J. A unified theory of arcs and their electrodes[J]. *Journal de Physique IV*, 1997, 7(C4): C4-283-C4-294.
- [14] Zhu Peiyuan, Lowke J J, Morrow R. A unified theory of free burning arcs, cathode sheaths and cathodes[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1992, 25(8): 1221-1230.
- [15] Barrett J, Clement C. Kinetic evaporation and condensation rates and their coefficients[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1992, 150(2): 352-364.
- [16] 程月,俞哲,李金懋,等. 氩气电弧等离子体炬提纯大鳞片石墨研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 065021. (Cheng Yue, Yu Zhe, Li Jinmao, et al. Study on purification of flaky graphite by argon arc plasma torch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 065021)