

混合靶材对激光触发真空开关导通过程的影响分析

郭洪瑛¹ 陈占清^{1*} 许春雨¹ 柏昕澎¹ 康爱亮¹ 廖敏夫² 雷志鹏¹

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院 太原 030024; 2. 大连理工大学 电气工程学院 大连 116024)

The Influence of Mixed Target on the Laser Triggered Vacuum Switch Conduction Process

GUO Hongying¹, CHEN Zhanqing^{1*}, XU Chunyu¹, BAI Xinpeng¹, KANG Ailiang¹, LIAO Minfu², LEI Zhipeng¹

(1. School of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract The diffusion of the vacuum arc in laser triggered vacuum switch (LTVS) determines multiple key performances of the switch, such as trigger delay time, discharge power and high-frequency interruption capacity. In this paper, dynamic diffusion processes of pulsed vacuum arc in LTVS are investigated based on detachable vacuum chamber and arc images. The effects of materials of Ti+KCl mixture on LTVS trigger delay time and interruption capacity are analyzed. Combined with arc magneto hydro dynamic (MHD) simulation, the physical processes of the development and distribution of pulsed vacuum arc plasma during the arcing period are analyzed. The results prove that the irradiation of the laser beam on target materials heats the materials, triggering them to evaporate and ionize to produce a large amount of initial plasma and resulting in the fast triggering of LTVS. Due to arc thermal erosion, the target materials remain a strong plasma source, affecting the process of arc diffusion and gap discharge. The released particles from the target under the thermal effects of the vacuum arc during the interruption period will affect the current interruption capacity of LTVS. It is suggested that the target materials of LTVS should be reasonably designed according to the actual application requirements to improve the related performance parameters.

Keywords Laser triggered vacuum switch, Target materials, Switching performance, Arc image, MHD simulation

摘要 激光触发真空开关(LTVS)内电弧的发展扩散决定了开关的触发时延、放电功率、高频开断能力等多个关键性能。文章基于可拆卸真空腔体建立试验平台,结合电弧图像,对LTVS内脉冲真空电弧扩散的动态过程进行研究。分析了Ti+KCl混合材料对LTVS触发时延和电流开断能力的影响。结合电弧磁流体动力学(MHD)仿真,研究了燃弧期间真空电弧等离子体的发展过程和时空分布特性。结果表明,激光加热触发材料使之蒸发并电离产生大量初始等离子体,在材料表面建立起始放电通道,使LTVS快速触发。受电弧热烧蚀作用,燃弧阶段触发材料仍是强等离子体源,影响真空电弧扩散和间隙的放电过程。此外,触发材料在电弧熄灭阶段受热释出的材料微粒会在一定程度上影响LTVS的电流开断能力。建议根据LTVS的实际应用需求合理设计其触发材料,以改善相关性能参数。

关键词 激光触发真空开关 触发材料 开关性能 电弧图像 MHD 仿真

中图分类号: TM564 文献标识码: A doi: [10.13922/j.cnki.cjvst.202410010](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjvst.202410010)

激光触发真空开关(Laser Triggered Vacuum Switch, LTVS)是一种新型脉冲功率闭合开关。其

通过真空开关与脉冲激光技术发展而来,利用脉冲激光照射并烧蚀触发材料,产生大量初始等离子体,

收稿日期: 2024-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52177131); 山西省“1331工程”提质增效建设计划项目(晋教科[2021]14号); 山西省基础研究计划项目(202203021212225; 202203021212274)

* 联系人: E-mail: chenzhanqing@tyut.edu.cn

使真空间隙快速闭合^[1-5]。因其具有触发时延短、导通波形抖动低、通流容量大、使用寿命长等优势,LTVS在脉冲激光器、电磁发射系统、直流断路器、直线变压驱动装置等大电流快速关合领域已展现出极佳的发展前景^[6-9]。

自1973年Makarevich A A等^[10]采用脉冲激光触发真空间隙,证明LTVS具有优良的通流能力以来,学界针对LTVS的性能提升及触发机理开展了大量研究。1988年美国Sandia实验室的Brannon P J等^[11]研究发现以Ti和KCl混合物作为靶材,LTVS的触发时延低于100 ns,且认为激光对靶材料的热效应是间隙内初始等离子体产生的原因,电弧的稳定燃烧则依赖间隙内的离子再生。大连理工大学赵岩等^[12]对LTVS时延特性进行研究,发现激光能量的增加和激光波长的减小会缩短LTVS的触发时延,增加间隙距离则会一定程度上延长LTVS的触发时延。2015年起,华中科技大学何正浩等^[13-14]研究了多棒型LTVS的导通过程,认为初始等离子体的扩散主要依赖速度更快的自由电子迁移,使开关获得更短的延迟时间且触发稳定性更高。大连理工大学赵通等^[15]发现,LTVS开断高频电流的能力受到电弧对触发材料烧蚀作用的影响。

由上述分析可见,此前关于LTVS的研究主要针对其时延特性、高频开断能力等性能的提升,而LTVS放电间隙内真空电弧的发展、扩散过程对其时延特性、通流容量、高频开断能力和使用寿命等诸多关键参数影响显著,先前研究并没有提到。对于真空电弧发展扩散的研究则主要关注工频条件下真空断路器内电弧的发展。针对脉冲真空电弧扩散过程及影响因素的研究相对较少。如西安交通大学王立军等^[16]发现,随着电流幅值和间隙距离的增加,工频真空电弧的弧柱收缩被增强,影响真空断路器的电流开断能力。与断路器内因触点分离而被引燃的工频真空电弧不同,LTVS的放电依赖激光与触发材料的相互作用,且放电时间通常在微秒或纳秒量级,通流时间短,电弧燃烧过程易受熔沸点较低的触发材料影响。

为探明LTVS脉冲放电间隙内真空电弧的扩散过程及触发材料对开关性能的影响机制,本文基于可拆真空腔体搭建实验平台,结合电弧图像拍摄、燃弧数值模拟,研究了触发材料对真空电弧发展扩散过程,以及对开关触发时延、电流开断能力等关

键特性的影响,根据试验结果给出参数优化建议。

1 实验平台搭建

1.1 LTVS 放电试验平台

LTVS放电的实验电路如图1所示,由激光触发系统、RC放电电路和基于可拆真空腔体的LTVS样机组成。激光触发系统采用Nd:YAG激光器产生波长1064 nm,脉宽10 ns的脉冲激光。激光束通过全反镜、分光镜和聚焦镜片后,聚焦在触发材料表面,材料表面光斑面积1.1 mm²。激光信号由光电探头检测。RC放电电路中,脉冲电容C₀为8.9 μF,电路电阻R_L为11.85 Ω,电桥测得电路的杂散电感L_d为4.8 μH。LTVS的电压由高压探头(TeKP6015 A)测量。脉冲电流探头C_I由TeKCT-4和TCP202 A组成。高速相机的采样帧率最大为100000 fps,曝光时间可根据试验要求调整。触发控制器分别控制激光头和高速摄像机的动作。

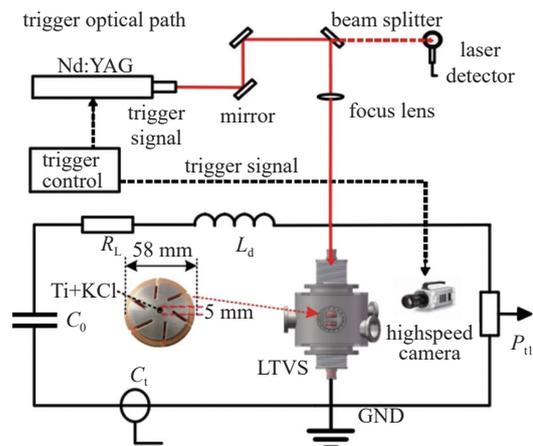


图1 LTVS 实验电路图

Fig. 1 Experimental circuit for LTVS

LTVS腔体内真空度由抽气系统维持在 2×10^{-5} Pa以下。设置LTVS为正极性工作方式。腔体内电极为纵磁杯状电极,表面材料为CuCr₅₀合金,电极直径为58 mm。电极间距设为8 mm。根据前人研究,触发材料选用目前常用的Ti与KCl的混合物,1:1混合后压制成锥状结构,填充于阴极中心的5 mm凹槽内。设置锥型靶材顶部与阴极表面之间距离为1 mm,以减少电弧烧蚀对材料的影响。

1.2 LTVS 的放电波形

工作电压4.4 kV,LTVS的放电波形如图2所示。设置作用于触发材料表面的激光能量为25 mJ。

激光作用 68 ns 后, LTVS 上的电压开始下降, 表明此时间隙内建立了起始放电通道, LTVS 被触发。此前研究通常定义 LTVS 的触发时延为激光信号开始上升到工作电压开始下降的时间^[17]。激光作用约 5 μs 后, 经 LTVS 传输的脉冲电流达到峰值 230 A。随后, 电流受回路参数影响, 逐渐衰减至零。

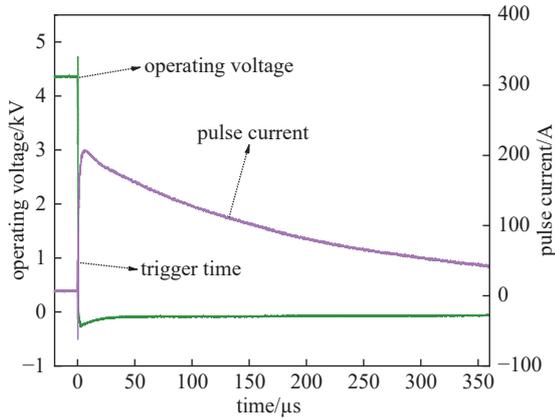


图2 LTVS 放电波形

Fig. 2 LTVS discharge waveform

2 LTVS 放电过程分析

采用高速摄像机拍摄的 LTVS 放电过程中真空电弧图像如图 3 所示。结合图 2 可知, LTVS 被触发后, 间隙内放电光斑亮度随着电流的上升快速增加, 后随电流的下降逐渐衰减。激光照射 145 μs 后, 电流降至 100 A 以下, 电弧弧柱开始断裂。LTVS 在 360 μs 左右完成电流开断, 电弧熄灭。

随后利用 matlab 对电弧图像进行分析, 计算了真空电弧面积和周长随时间的变化。计算原理如下: 将电弧图像分为若干像素点, 用二值法将白色像素记为 1, 黑色像素记为 0, 电弧周长和面积为白色区域的周长和面积。标定一个白色像素点为一个小正方形, 换算后一个像素点面积为 0.07 mm^2 , 边长为 0.2646 mm, 如图 4 所示。计算所得面积周长曲线如图 5 所示。根据电弧图像和计算的电弧面积和周长, 可将燃弧过程分为三个阶段: 触发阶段(图 3(a)~图 3(d))、扩散阶段(图 3(e)~图 3(h))和熄弧阶段(图 3(i)~图 3(l))。

触发阶段, 激光与触发材料相互作用释放初始等离子体, 初始等离子体不断与触发材料及真空电极发生碰撞, 并在电离能/逸出功较低的触发材料表面形成初始放电通道, 开始传输电荷, 如图 3(a)中材料表面放电光斑所示。随着间隙传输电流的增

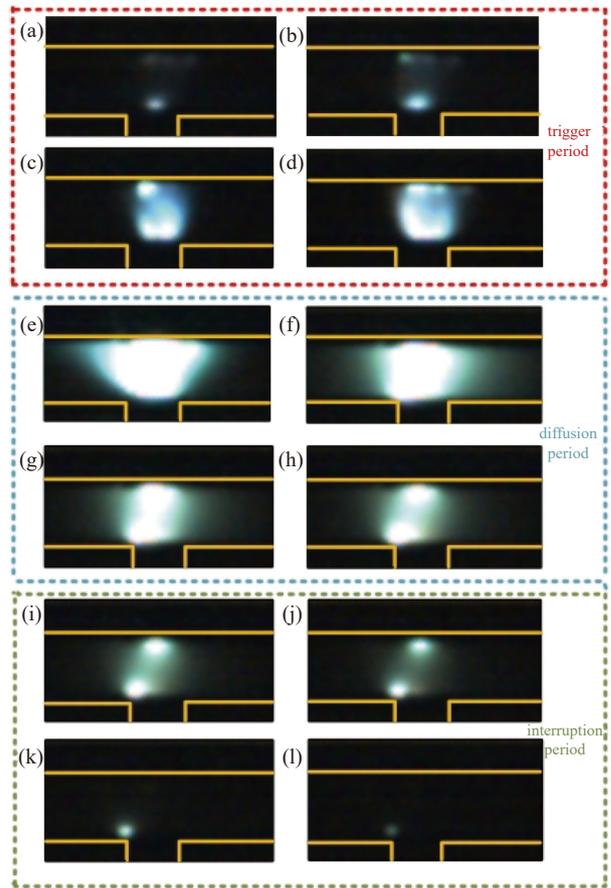


图3 LTVS 不同时刻电弧图像。(a)0.15 μs 时刻, (b)0.6 μs 时刻, (c)1 μs 时刻, (d)3 μs 时刻, (e)5 μs 时刻, (f)35 μs 时刻, (g)85 μs 时刻, (h)115 μs 时刻, (i)145 μs 时刻, (j)175 μs 时刻, (k)245 μs 时刻, (l)345 μs 时刻

Fig. 3 LTVS arc images at different times. (a) 0.15 μs moment, (b) 0.6 μs moment, (c) 1 μs moment, (d) 3 μs moment, (e) 5 μs moment, (f) 35 μs moment, (g) 85 μs moment, (h) 115 μs moment, (i) 145 μs moment, (j) 175 μs moment, (k) 245 μs moment, (l) 345 μs moment

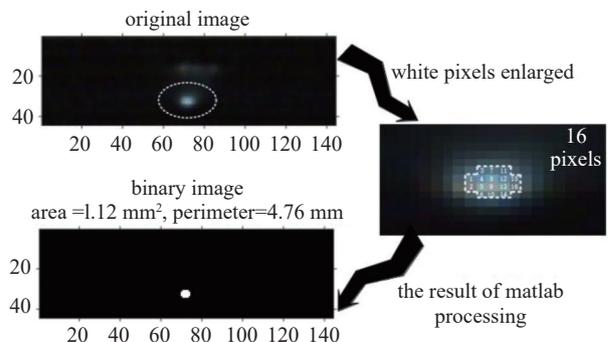


图4 二值化标定图像周长面积

Fig. 4 Binarize the perimeter area of the image

加, 在电极表面热作用和间隙鞘层电场作用下, 更多带电微粒进入真空间隙, 电弧等离子体与电极表

面和触发材料的碰撞作用被加强,初始放电通道逐渐演变为真空电弧,间隙内电弧通道的亮度、面积和周长急剧增大(如图3(b)~图3(d)以及图5红框所示)。电弧扩散期间,真空电弧扩散主要受触发材料释放微粒和间隙电磁场的影响。由于触发材料的电离能/逸出功较低,触发材料更容易在等离子体的碰撞作用下发生电离,释放新的带电微粒进入间隙。因此图3中电弧主要集中在触发材料表面。电流达到峰值时,图3(e)中的真空电弧的面积和周长最大,亮度也最高。随后LTVS上的电流逐渐减小,间隙内注入等离子体的密度也逐渐下降,碰撞电离的作用相应降低,图3(f)至图3(h)中真空电弧的亮度、面积和周长逐渐减小(如图5蓝框)。随着电流的减小,等离子体发生碰撞引起电离的概率进一步降低,与电极表面碰撞引起电离的几率更低,电弧的面积和周长逐渐减小(如图5绿框)。此时,间隙内碰撞电离主要发生在触发材料与阴极界面附近的电场不均匀区域。因此图3(i)至图3(l)中电弧弧柱断裂后,电弧主要位于触发材料与阴极凹槽的交界位置。

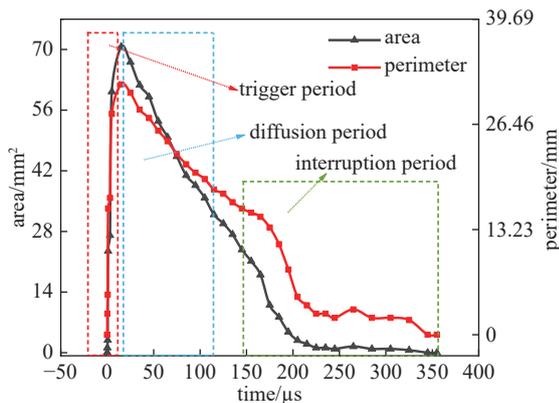


图5 LTVS 电弧面积周长变化曲线
Fig. 5 LTVS arc area perimeter curve

3 触发材料对 LTVS 触发与燃弧过程的影响

由上述分析可知,触发材料在 LTVS 的放电过程中不断向间隙释放带电微粒,影响放电通道的扩散并造成其工作性能差异。

3.1 触发材料对 LTVS 时延特性的影响分析

LTVS 的快速触发主要依赖激光与触发材料的相互作用, Ti 与 KCl 的混合材料主要由 Ti 吸收激光能量,使 KCl 熔融、气化并被电离产生大量初始等离子体以建立放电通道。采用高速相机拍摄得到

LTVS 初始等离子体的扩散形态如图6所示。在激光热作用与光致级联电离作用下,初始等离子体呈扩散状离开材料表面,激光与材料发生作用区域附近的等离子体密度最高,光斑亮度也最大^[17-18]。

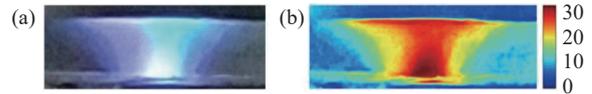


图6 LTVS 初始等离子体扩散形态。(a)电弧图像,(b)伪彩色处理图像

Fig. 6 Initial plasma diffusion pattern of LTVS. (a) Arc image, (b) false color processing image

根据此前研究,LTVS 的触发时延受触发材料的影响显著。改变触发材料种类、混合材料比例、靶材结构、材料深度等参数都会对 LTVS 的触发时延造成不同程度的影响^[19]。根据图6等离子体图像,可描述正极性 LTVS 内初始等离子体的扩散形态如图7所示。受间隙电场影响,扩散至间隙的初始等离子体成分以质量轻、速度快的自由电子为主,向阳极运动的 Cl^- 速度较慢; Ti^+ 和 K^+ 逸出材料表面后被电场减速,向阴极运动。因此,相较于负极性间隙,正极性 LTVS 可获得更短的触发时延。

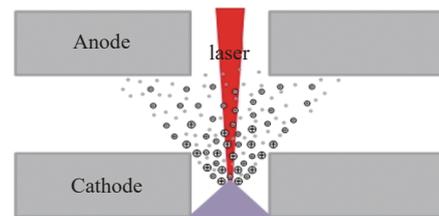


图7 正极性 LTVS 初始等离子体扩散形态

Fig. 7 Positive LTVS initial plasma diffusion pattern

此外,触发材料种类或混合材料的比例改变时,进入间隙的初始等离子体成分或比例被改变,导致开关触发时延的变化。靶材结构变化主要影响材料对激光能量的吸收效果,而靶材深度的变化改变了初始等离子体的扩散距离,影响 LTVS 的触发时延。当 Ti 与 KCl 混合比例为 1 : 1 时,触发时延在 100 ns 以内,虽然比高 Ti 含量下触发时延要高,但其在纳秒级别的时延已经满足实验要求,且开断电流能力比较稳定,靶材使用寿命较长。相关参数对触发时延的影响规律此前已有详细研究^[20-21],本文不再赘述。

3.2 LTVS 内电弧发展过程仿真

燃弧阶段电弧对触发材料的烧蚀作用会在触

发材料表面形成放电斑点,持续向间隙释放更多带电微粒,从而成为真空间隙内主要的等离子体源之一,如图 3 所示。为更深入地分析燃弧阶段触发材料对电弧扩散的影响,本文建立了 LTVS 内真空电弧的 MHD 模型,对等离子体的时空分布特性进行模拟。

3.2.1 仿真模型介绍

LTVS 内真空电弧仿真模型基于磁流体动力学理论构建。模型将真空电弧视为导电流体,建立的 MHD 模型包括电、磁、流体等物理场,结合电子与离子的质量守恒、动量守恒、能量守恒等相关方程,对燃弧过程进行分析。模型是高度非线性的方程组,需要用数值求解方法进行求解,利用 COMSOL 多物理场仿真软件对燃弧阶段真空电弧等离子体的扩散和分布特性进行计算,有效的解决了复杂的计算过程。

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_e v) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i u) = 0 \quad (2)$$

式(1)、(2)分别表示电子和离子的质量守恒方程。其中,电子、离子质量密度由 ρ_e 和 ρ_i 表示, $\rho_e = n_e m_e$, $\rho_i = n_i m_i$; 电子、离子的质量分别为 m_e 和 m_i , 电子速度为 v , 离子速度为 u 。

$$\frac{\partial (\rho_e v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_e v v) = F_{ve} - \nabla p_e + f_{ie} + f_{the} + \nabla \cdot [\tau_{ij}]_e \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho_i u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i u u) = F_{vi} - \nabla p_i + f_{ei} + f_{thi} + \nabla \cdot [\tau_{ij}]_i \quad (4)$$

式(3)、(4)分别表示电子和离子的动量守恒方程。其中,电子、离子的体积力为 F_{ve} 和 F_{vi} , 电子和离子压力梯度为 ∇p_e 和 ∇p_i , 电子离子相对运动产生的摩擦力为 f_{ie} 和 f_{ei} , 电子离子之间的热力为 f_{th} 和 f_{thi} , 粘性应力用 $\nabla \cdot [\tau_{ij}]_e$ 和 $\nabla \cdot [\tau_{ij}]_i$ 表示。

$$\frac{d(\rho_e C_{pe} T_e)}{dt} + \nabla \cdot (\rho_e C_{pe} T_e v) = -\nabla \cdot q_e + \frac{dp_e}{dt} + \phi_e + Q_{ei} + S_e \quad (5)$$

$$\frac{d(\rho_i C_{pi} T_i)}{dt} + \nabla \cdot (\rho_i C_{pi} T_i v) = -\nabla \cdot q_i + \frac{dp_i}{dt} + \phi_i + Q_{ie} + S_i \quad (6)$$

式(5)、(6)分别表示电子和离子的能量守恒方程。其中,电子等压比热为 $C_{pe} = 5k/2m_e$, 离子等压比热为 $C_{pi} = 5k/2m_i$, k 代表 Boltzmann 常数, 电子和离

子的温度为 T_e 和 T_i , 电子离子的热流密度分别为 q_e 和 q_i , 电子离子的粘性耗散功分别为 ϕ_e 和 ϕ_i , 电子与离子碰撞损失的能量为 Q_{ei} , 离子吸收的能量为 Q_{ie} , 电子与离子的热项分别为 S_e 、 S_i 。

此外,该电弧模型基于以下假设:(1)认为该模型满足等离子体的准电中性条件,用宏观流体力学描述等离子体流动。(2)认为间隙内等离子体处于完全电离状态。(3)认为阴极和触发材料是间隙等离子体产生的唯一来源。(4)认为电子和离子形态为完全气体。

3.2.2 仿真设置条件

模型的网格剖分如图 8 所示,电极材料选取 CuCr₅₀ 合金,电极半径为 29 mm,间隙距离设为 8 mm,触发材料为半径 2.5 mm 的圆柱状结构,靶材顶部比阴极表面低 1 mm。结合此前实验触发过程分析,电弧电流峰值为 230 A,由于电弧电流较小,等离子体速度约为 1×10^4 m/s,电弧属于超音速流动。对于热传导模块,在阴极侧设置了狄利克雷边界条件,在阳极设置了电子热流密度,侧面则为绝热条件。在初始条件中,阴极边界电子温度设为 1.5 eV,环境温度设为 0.026 eV。对于流体动力学模块,初始条件中阴极边界离子速率设为 1×10^4 m/s,阴极边界离子温度设为 0.3 eV。

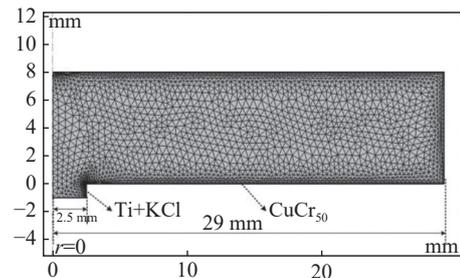


图8 真空电弧 MHD 模型网格图

Fig. 8 Vacuum arc MHD model grid diagram

3.2.3 仿真适用条件

本文的仿真为超音速或亚音速真空电弧燃弧阶段的模型。模型中流体动力学模块计算对象为离子,描述的是离子质量、动量、能量守恒;传热模块计算对象为电子,描述的是电子能量守恒。仿真模型适用于压力范围在 10^{-4} – 10^{-7} Pa 之间的高真空环境。在这个范围内,气体分子之间碰撞相对较少,电弧主要由电子、离子与电极表面的相互作用主导,符合模型的物理假设。当压力超出范围时,气体分

子对电弧的影响逐渐增大,模型的准确性会降低。模型只适用于常见的金属电极材料,如铜、钨及其合金,对于一些特殊的新型材料或复合材料,超出了模型的适用范围。

3.2.4 仿真结果分析

LTVS被触发后 $5\ \mu\text{s}$,即电流达到峰值时刻间

隙内电子和离子的温度与密度分布如图9所示。电流 $230\ \text{A}$ 时,间隙内等离子体呈扩散形态分布,触发材料表面区域的自由电子密度最高,达到 $3.96\times 10^{22}\ \text{m}^{-3}$,温度可达 $17387\ \text{K}$,表明电弧等离子体与触发材料的碰撞电离程度最剧烈。仿真规律与电弧图像分布情况相吻合。

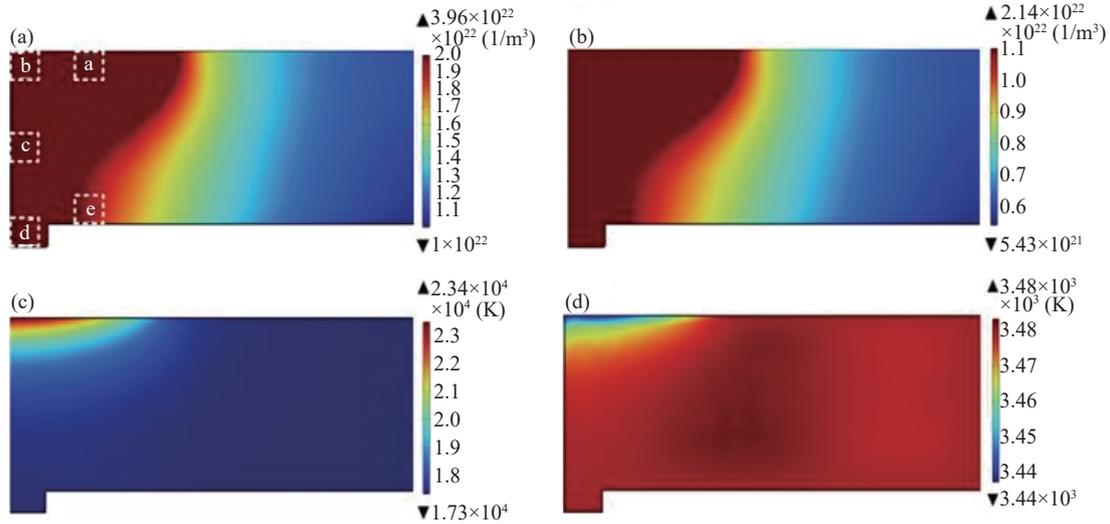


图9 燃弧过程各参数时空分布情况。(a)电子密度,(b)离子密度,(c)电子温度,(d)离子温度

Fig. 9 Spatial and temporal distribution of parameters in the arcing period. (a) Electron density, (b) ion density, (c) electron temperature, (d) ion temperature

为便于后续分析,将间隙燃弧区域划分为5个区域,其中a为近阳极区,b为阳极中心区,c为间隙中心区,d为阴极中心区,e为近阴极区。改变仿真模型中电流幅值,得到燃弧期间不同区域的电子密度变化如图10所示。可见间隙内自由电子密度与电流幅值成正相关。燃弧期间由于电弧的热烧蚀作用,熔沸点更低的Ti+KCl混合物相较于铜电极来说,更容易释放粒子到间隙中,作为主要的等离

子体源,有利于在间隙建立更强的放电通道,影响间隙的电流传输过程,即影响开关的放电功率。本文实验结果与文献[22]的研究结论基本一致。

本文对真空电弧燃弧阶段进行了实验与仿真方面的分析,但二者之间存在一定的误差。实验方面,由于相机帧率为 $100000\ \text{fps}$,因此在燃弧阶段拍摄的电弧图像为电弧发展 $10\ \mu\text{s}$ 内累加的结果,而仿真模型是在一定假设条件下建立的具体某一时刻的燃弧图像。但仿真结果与实验结果电弧图像较吻合,故可以近似认为两者是一个条件下的燃弧过程,可以用仿真结果对燃弧过程进行微观分析。

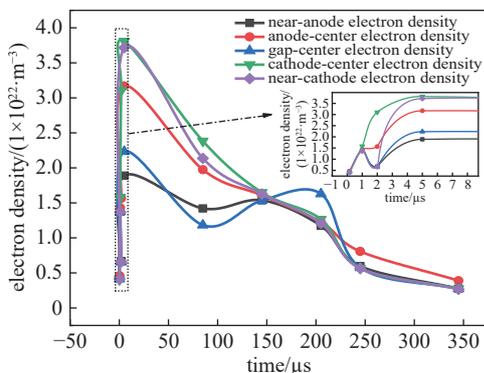


图10 不同时刻各区域电子密度变化曲线

Fig. 10 Electron density curves in each region at different time

4 触发材料对真空间隙电弧熄灭过程的影响分析

由于触发材料密度相对较低,且其逸出功/电离能均低于致密的电极表面材料 CuCr_{50} 。电弧熄灭阶段,间隙内密度较低的电弧等离子体仍会与触发材料发生碰撞,电离产生新的带电微粒进入间隙,影响LTVS的电弧熄灭过程,降低LTVS的电流开断能力。这也是触发间隙内电弧与真空断路器内

电弧的主要区别之一。LTVS 工作电压 3.9 kV, 峰值电流 180 A 时, 在熄弧阶段观察到明显的触发材料释放微粒进入间隙的过程, 拍摄图像如图 11 所示。

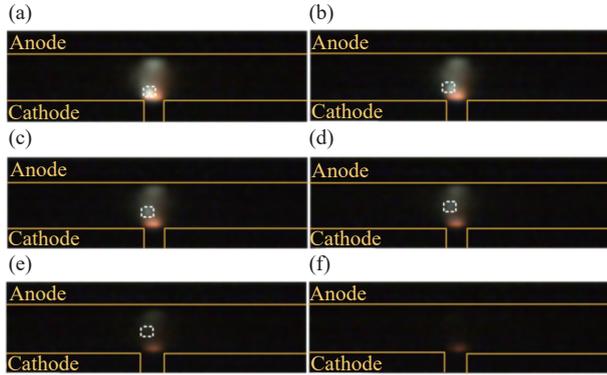


图11 LTVS 熄弧阶段电弧图像。(a)215 μs 时刻, 电流 70 A, (b)235 μs 时刻, 电流 64 A, (c)255 μs 时刻, 电流 60 A, (d)275 μs 时刻, 电流 55 A, (e)295 μs 时刻, 电流 51 A, (f)315 μs 时刻, 电流 44 A

Fig. 11 Arc image at interruption period. (a) 215 μs moment, current 70 A, (b) 235 μs moment, current 64 A, (c) 255 μs moment, current 60 A, (d) 275 μs moment, current 55 A, (e) 295 μs moment, current 51 A, (f) 315 μs moment, current 44 A

在图 10 仿真结果中, 出现在 150 μs –200 μs 时间隙内电子密度随电流的减小而增大的趋势, 本文认为这是由于触发材料受电弧热烧蚀影响, 向间隙释放带电粒子, 影响间隙内电弧的熄灭过程和开关的电流开断能力。图 10 仿真结果也可说明图 11 实验观察到的弧后靶材微粒逸出的过程, 亦可解释文 [23] 中不同触发材料 LTVS 高频开断能力出现差异的原因。

作为对比, 本文调整触发开关样机的触发方式, 以 Al_2O_3 陶瓷为闪络材料, 对比沿面闪络的电触发真空开关在相近条件下, 开断电流时的情况。拍摄得到的电弧图像如图 12 所示。可见随着电流的衰减, 间隙内真空电弧逐渐熄灭, Al_2O_3 陶瓷并未受电弧烧蚀影响向间隙释放带电微粒, 影响间隙的电流开断能力。由图 11 与图 12 结果对比分析可知, 熄弧阶段 LTVS 内真空电弧对触发材料热作用释放的带电粒子, 会在一定程度上影响间隙的电流开断能力。因此, 设计用于高频开断场合的 LTVS 时, 应调整开关的触发材料种类或混合比例, 以提升其电流开断能力。

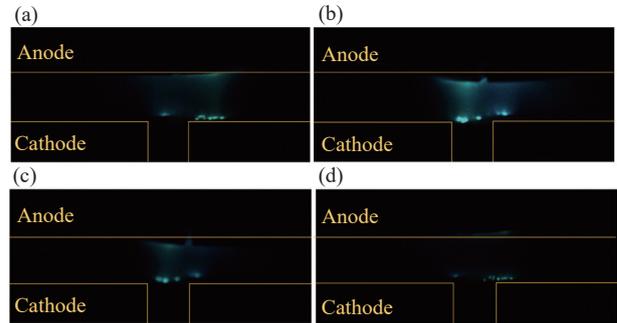


图12 电触发 TVS 熄弧阶段电弧图像。(a)160 μs 时刻, 电流 77 A, (b)161 μs 时刻, 电流 47 A, (c)162 μs 时刻, 电流 17.6 A, (d)163 μs 时刻, 电流 7.5 A

Fig. 12 Image of the arc during the interruption period of TVS triggered by electricity. (a) 160 μs moment, current 77 A, (b) 161 μs moment, current 47 A, (c) 162 μs moment, current 17.6 A, (d) 163 μs moment, current 7.5 A

5 结论

本文结合仿真与实验研究, 分析了触发材料对 LTVS 内电弧扩散过程和关键工作参数的影响, 可以得到以下结论:

与真空断路器内电弧扩散不同, LTVS 内真空电弧扩散受触发材料的影响。激光作用于触发材料, 产生并快速向间隙内输送大量初始等离子体, 加速间隙触发; 燃弧期间电弧对触发材料的烧蚀作用会在触发材料表面形成放电斑点, 向间隙释放更多带电微粒, 有利于建立有效的放电通道, 提升 LTVS 的放电功率; 触发材料在熄弧阶段受电弧热作用向间隙释放带电微粒, 会在一定程度上影响开关的高频电流开断能力。建议根据 LTVS 应用需求, 合理调整其触发材料以提升其关键性能。

参 考 文 献

- [1] Zhang H B. Research on recovery characteristics of natural medium of laser triggered vacuum switch[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021 (张虎波. 激光触发真空开关固有介质恢复特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021 (in Chinese))
- [2] Sun Y F, Lu G, Meng Q X, et al. Structure design of a 300 kV laser triggered multistage vacuum switch[J]. *Vacuum Electronics*, 2023(5): 43–49 (孙一帆, 卢刚, 孟庆鑫, 等. 300 kV 激光触发多级真空开关结构设计 [J]. *真空电子技术*, 2023(5): 43–49 (in Chinese))
- [3] Mao X P, et al. Research on the time-delay characteristics of the laser-triggered vacuum switch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(6): 2005–2010

- [4] Sun Y J. Research on switching characteristics of laser-triggered vacuum switch under magnetic field control[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022 (孙依杰. 磁场调控下激光触发真空开关开断特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022 (in Chinese))
- [5] Anderson R A, Brainard J P. Mechanism of pulsed surface flashover involving electron stimulated desorption[J]. *Appl Phys*, 1980, 51(3): 1414–1421
- [6] Wang J M, Yuan S. Theory of large capacity vacuum switch and its product development[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001 (王季梅, 苑舜. 大容量真空开关理论及其产品开发 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001 (in Chinese))
- [7] Fan W F, He Z H, Wang Y, et al. Experiment research on the trigger characteristics of a laser-triggered vacuum switch[J]. *Proceedings of The CSEE*, 2015, 35(20): 5360–5366 (樊文芳, 何正浩, 王英, 等. 一种激光触发真空开关的触发特性研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(20): 5360–5366 (in Chinese))
- [8] Xin Y, He Z, Liu Y, et al. The effect of laser wavelength on the delay time of laser triggered vacuum switch[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(11): 114706
- [9] Chen Z Q, Liao M F, Duan X, et al. Investigations on trigger process of triple-gap laser triggered multi-stage vacuum switch[J]. *Vacuum*, 2024, 227: 113467
- [10] Makarevich A A, Rodichkin V. A vacuum spark gap with laser firing[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 1973, 16(1-6): 1716–1717
- [11] Brannon P J, Cowgill D F. Low jitter laser triggered vacuum switch using a composite target[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1988, 16(2): 325–327
- [12] Zhao Y, Duan X Y, Liao M F, et al. Delay characteristic optimization of laser triggered vacuum switch[J]. *High Voltage Technology*, 2019, 45(12): 3949–3953 (赵岩, 段雄鹰, 廖敏夫, 等. 激光触发真空开关时延特性优化 [J]. *高电压技术*, 2019, 45(12): 3949–3953 (in Chinese))
- [13] He Z H, Wei L C, Mao X P, et al. Research on polarity configuration characteristics of laser-triggered vacuum switch[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(14): 2–5 (何正浩, 魏良才, 毛晓坡, 等. 激光触发真空开关极性配置特性的研究 [J]. *电工技术学报*, 2015, 30(14): 2–5 (in Chinese))
- [14] Mao X P, He Z H, Wang Y, et al. Research on the interaction of primary plasma and main electrode for laser triggered vacuum switch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(11): 3592–3597
- [15] Zhao T, Liao M F, Chen Z Q, et al. Research on trigger mechanism of vacuum switch triggered by laser with different polarity[J]. *Journal of Electrical Technology*, 2020, 35(15): 3341–3347 (赵通, 廖敏夫, 陈占清, 等. 不同极性激光触发真空开关触发机制研究 [J]. *电工技术学报*, 2020, 35(15): 3341–3347 (in Chinese))
- [16] Wang L J, Jia S L, Shi Z Q, et al. Research on magneto-hydrodynamic model and simulation of vacuum arc[J]. *Proceedings of The CSEE*, 2005, 25(4): 2–4 (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): 2–4 (in Chinese))
- [17] Chen Z Q. Study on laser triggered series vacuum gap delay characteristics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021 (陈占清. 激光触发串联真空间隙时延特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021 (in Chinese))
- [18] Fan W F. Design and research on the triggering mechanism of laser triggered vacuum switch[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016 (樊文芳. 激光触发真空开关的设计及触发机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016 (in Chinese))
- [19] Yin Y, Yang J, Zhong H H, et al. Laser trigger switch trigger delay and jitter characteristics[J]. *High Voltage Technology*, 2014, 40(1): 194–200 (殷毅, 杨杰, 钟辉煌, 等. 激光触发开关触发延时及抖动特性 [J]. *高电压技术*, 2014, 40(1): 194–200 (in Chinese))
- [20] Zheng C Y. Effects of laser target materials for performance of the laser triggered vacuum switch[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017 (郑春阳. 靶材对激光触发真空开关工作性能的影响研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017 (in Chinese))
- [21] He W L. Research on triggered characteristics of ltvs with different mixed target materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019 (贺伟亮. 不同靶材对 LTVS 触发机制的影响研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019 (in Chinese))
- [22] Lu G, Liao M F, Zhang M, et al. Experimental study on the initial current characteristics of laser-triggered vacuum switch during trigger process[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2023, 30(4): 1844–1849
- [23] Liao M F, Fan Z X, Chen Z Q, et al. Influence of electrode configurations on the interruption capacity of laser triggered vacuum switch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(6): 2180–2186