

激光与光电子学进展

基于双转盘电极结构的原子发射光谱油液检测技术

陈斌¹, 傅晓^{1*}, 段发阶¹, 闫钰¹, 黄锦幡¹, 钟国舜²¹天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;²中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100016

摘要 由于转盘电极原子发射光谱(RDE-AES)技术具有操作简单、无须制备样品、结果可靠性强等优良特性,被广泛应用于油液检测。但该技术采用的光源主要是电弧,由于电极磨损导致放电间隙改变造成的电弧不稳定等原因导致最后采集的光谱数据所分析的结果与实际存在误差。本文提出了一种基于“双转盘”电极结构的原子发射光谱油液检测装置的检测方法,即将传统“棒-转盘”电极结构中的棒电极更换为可以旋转的转盘电极,其显著优势是减小了电极磨损所带来的检测误差。对其结构进行物理建模,通过COMSOL多物理场仿真软件对电弧激发的过程进行了仿真,采用控制变量法研究了电极间隙、油膜厚度、外加激励三个主要变量对电弧激发效果的变化规律的影响,得到了影响因素与电弧激发时刻和激发瞬时温度的关系曲线图,并根据仿真结果进行了参数优化。仿真结果显示,“双转盘”电极结构较传统结构的激发效果有了明显改善,激发时间和激发温度都有一定的改善,尤其在大批量检测时电弧激发效果稳定,验证了该方法的先进性和实用性,为转盘电极原子发射光谱油液检测方法的进一步深入研究提供了分析支持。

关键词 仪器,测量与计量;双转盘;电弧激发;油液分析;原子发射光谱;COMSOL仿真

中图分类号 O657.31

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223175

Atomic Emission Spectrometry Oil Detection Technology Based on Double Turntable Electrode Structure

Chen Bin¹, Fu Xiao^{1*}, Duan Fajie¹, Yan Yu¹, Huang Jinfan¹, Zhong Guoshun²¹State Key Laboratory of Precision Testing Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²The 11th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Beijing 100016, China

Abstract Atomic emission spectroscopy of turntable electrode (RDE-AES) is widely used in oil detection because of its simple operation, no need for sample preparation, and high reliability. However, the arc is the primary light source used in this technology. The instability of the arc caused by the change in the discharge gap induced by electrode wear and other factors leads to errors between the analysis results of the last collected spectral data and the actual situation. Herein, a method using atomic emission spectrometry with an oil detection device based on the “double turntable” electrode structure is proposed. In other words, the rod electrode in the traditional “rod turntable” electrode structure is replaced by a turntable electrode that can rotate. Its significant advantage is that it reduces the detection error caused by electrode wear. For its structural physical modeling, the process of arc excitation is simulated by COMSOL multi physical field simulation software. Further, the changing rules of electrode gap, oil film thickness, and external excitation on the arc excitation effect are explored using the control variable method. The effects of the influencing factors on the arc excitation time and instantaneous excitation temperature are obtained, and the parameters are optimized according to the simulation results. The simulation results show that the excitation effect of the “double turntable” electrode structure is significantly improved compared with the traditional structure, and the excitation time and temperature are improved to a certain extent. In particular, the arc excitation effect is stable in mass testing, which verifies the progressiveness and practicability of this method. It also provides analytical support for in-depth research on oil detection using the method

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2022-12-22; 录用日期: 2023-01-10; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2010800)、国家自然科学基金(61905175, 61971307)、国家重点实验室探索性课题(Pilt2103)、霍英东教育基金会资助项目(171055)、青年人才托举工程(2021QNRC001)、广东省重点研发计划(2020B0404030001)、国防科技重点实验室基金(6142212210304)

通信作者: *fuxiao215@tju.edu.cn

based on turntable electrode atomic emission spectrometry.

Key words instrumentation, measurement, and metrology; double turntable; arc excitation; oil analysis; atomic emission spectrum; COMSOL simulation

1 引言

油液分析技术广泛应用于大型设备(如航空发动机、轮船汽轮机等)的状态检测,通过分析设备中润滑油颗粒的元素分布和含量变化等状态信息,在发生故障前预先警示、发生故障时判断其准确位置和类型,是大型设备健康运行的保障^[1-2]。当今油液分析的主要技术有理化指标分析、红外光谱、铁谱分析、原子发射光谱和颗粒计数等方法^[3]。其中原子发射光谱技术指利用电弧、火花、激光、辉光等作为激发源,使气态原子或离子受激发后发射出光谱,根据特征谱线的强度,来测定某种元素的含量^[4]。因其具有样品无须处理、检测精度高、分析速度快、重复性好以及单次分析容量大等优点,成为油液分析的主要技术^[5]。第二次世界大战后,丹佛和里奥格兰德西部铁路公司通过观察由碳电极所激发的电弧蒸发油样所产生的谱线来分析柴油机车发动机的状态^[6]。1978年,Lukas等提出转盘电极原子发射光谱(RDE-AES)技术,该技术优点突出但其缺点也很明显,只能应用于颗粒直径在 $10\ \mu\text{m}$ 以下的磨粒分析^[7]。2005年,Lukas等^[8]又提出一种转盘电极过滤器技术,消除了粒径大小对RDE-AES分析的限制。该技术成为油液检测领域的主流技术之一,特别是在军事方面应用极广,如美国的MOA和Spectra等公司生产的油料光谱仪已经在美国军队中取得了显著的成果。进入21世纪,基于转盘电极的原子发射光谱研制成的油液光谱仪,逐渐朝着在线化、便携化、智能化、多功能化方向发展,使得检测速度和精度都有了明显的提升。2013年,郎宏等^[9]使用RDE-AES技术实现了对某型燃气轮机传动润滑系统磨损状况的监测,实现了早期机械磨损故障的及时诊断。2016年,张刘刘等^[10]设计了基于恒压变频直流火花光源的滑油光谱激发系统,对转盘电极原子发射光谱仪的激发光源和装置进行了优化;2022年,张鑫峒等^[11]对电弧发射光谱仪的电路部分进行了数字化设计,使得电弧激发效果更加稳定。但是现有的转盘电极原子发射光谱仪仍存在诸多的问题,比如电弧激发不稳定、电极持续磨损导致电极间隙的变化以及更换电极所带来的误差等因素,导致最后光谱分析得到的结果噪声大,与实际值存在一定的误差。为此,本文提出了一种基于双转盘电极结构装置的检测方法,即将传统“棒-转盘”电极结构中的棒电极更换为可以旋转的圆盘电极,可以有效地避免上述所带来的误差影响。同时通过仿真分析探究了影响电弧激发的因素,并且根据影响因素曲线图进行了参数优化,为转盘电极原子发射光谱仪结构的进

一步优化提供了一种可行的解决方案。

2 模型及方法

基于RDE-AES技术制作而成的油液光谱仪,如图1所示,主要包括三个部分:激发系统、光学系统、测量系统^[12]。激发系统由激发光源(图1中的电弧发生装置)和激发台(电极和油液)组成。光学系统包括准直镜、光谱收集器、光纤和光谱仪,主要作用是将激发产生的光谱分离成多条独立的特征谱线。测量系统主要是将特征谱线转换输出为数字信号,同时滤除光谱分析中产生的干扰,提高数据的准确性。

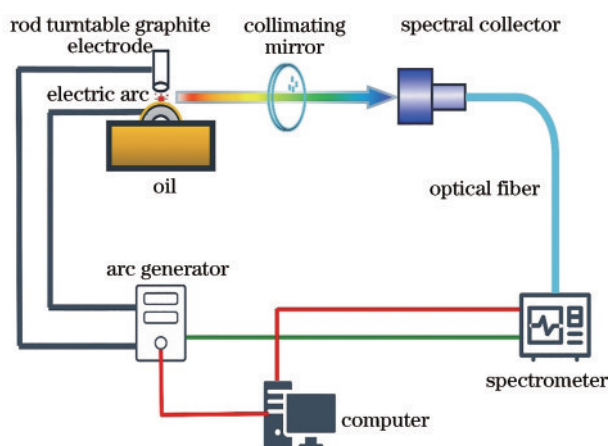


图1 棒-转盘油液检测装置系统图

Fig. 1 System diagram of rod turntable oil detection device

传统的电弧激发机械装置,采用的是“棒-转盘”结构。下端的转盘电极通过旋转将油液从油舟中送至靠近棒电极的轴线上,然后通过激发电路的外加激励,在两个电极之间进行“烧样”,之后通过光谱收集器和光纤的传导将激发出的原子光谱传输至光谱仪进行光谱特征谱线分析。传统棒电极的下端微尖且带有一定的弧度,这样是为了保证电极下端有一个合适的端面面积,保证既有较大的电流密度,还不会使电极在使用过程中磨损较大^[13]。但是长期使用棒电极仍会磨损严重导致电极间隙长度改变,同时为了换棒电极引入的人工误差是导致最后元素含量检测不准确的主要误差来源之一。在此基础上,本文提出了一种“双转盘”电极结构,可以有效避免上述问题的产生。

所设计的双转盘电极机械结构如图2所示。

将上端的棒电极更换为与下端电极同类型的转盘电极,并且同时由电机带动进行旋转,下端电极保持不变。“双转盘”结构的特点是转盘电极与垂直于它的轴有良好的轴对称性,由于转盘电极的边缘有一定的厚度,可以忽略流体力学上的边缘效应。最关键的是,这

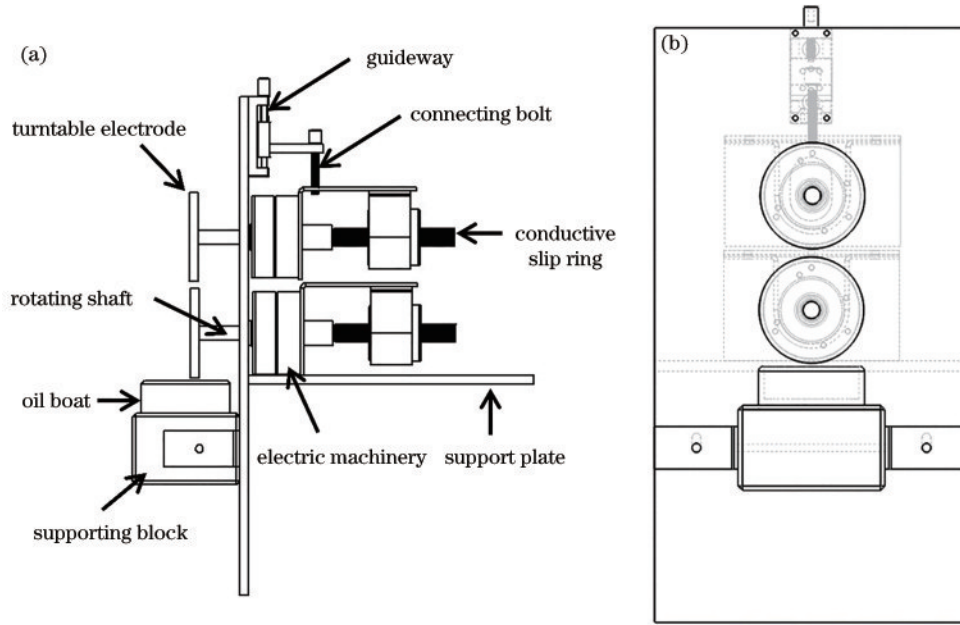


图 2 双转盘机械装置结构图。(a)侧视图;(b)正视图
Fig. 2 Structure diagram of double turntable mechanism. (a) Side view; (b) front view

种结构可以有效避免棒电极在激发过程中的电极持续磨损,进而也就减少了更换电极可能导致的人工装配误差。其原理简单推导如下:假设空心轴电机带动转盘转动的转速为 nr/min ,每分钟电极的磨损度为 a ,转盘电极的半径为 r ,双转盘电极间的间隙为 d ,如图 3 所示。

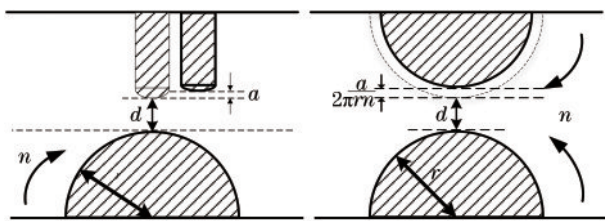


图 3 两种结构电极磨损间隙变化示意图。(a)棒-转盘结构;
(b)双转盘结构
Fig. 3 Schematic diagram of electrode wear gap change of two structures. (a) Rod turntable structure; (b) double turntable structure

在“棒-转盘”电极结构中,经过 1 min 后,放电间隙长度为

$$D_1 = d + a, \quad (1)$$

在“双转盘”电极结构中,经过 1 min 后,放电间隙长度为

$$D_2 = d + \frac{a}{2\pi n}. \quad (2)$$

由于两个装置中下端的电极都为旋转圆盘电极,所以此部分互相抵消,均不计入。由上述公式简单对比可知, $D_2 \ll D_1$ 。由此可以得出,双转盘结构比“棒-转盘”结构具有显著优势,电极磨损很小,几乎可以忽略不计。

3 理论分析

该装置激发所形成的等离子体电弧,主要由电子、离子、原子等构成,整个过程涉及到热场、电场、磁场、流场等多个物理场的叠加,其中产生的电弧受到重力、浮力、电磁力、黏性剪切力、压力、浮力、马兰戈尼力等多种力的作用^[14],导致该过程极其复杂。激发电弧的本质为电极间介质(本文中指空气和油膜蒸气)击穿的导电现象,即气体放电现象,宏观上表现为电弧光柱,微观上则是一种磁流体。通常等离子体的描述方法主要有两大类:流体描述和动理学描述。主要用到的公式有三大守恒方程(质量守恒、能量守恒、动量守恒)以及麦克斯韦方程组。等离子体处于的平衡状态一般是指其处于力学平衡状态,在此状态下等离子体平衡方程可以有与时间无关的解。由于等离子体具有过剩的自由能,即具有驱动不稳定的源,故偏离力学平衡的小扰动就有可能导致不稳定性,通过释放体系的自由能,使得等离子体更接近真实的热力学平衡。

为了简化模型和计算并鉴于上述的分析,作出如下假设:

- 1) 等离子电弧整体处于稳态,且是二维轴对称的。
- 2) 等离子体电弧的弧柱区处于局部热平衡状态(LTE),即等离子体的热力学与传输性能(如密度、导热系数、电导率等)只看作是温度的参数。
- 3) 等离子电弧的流动状态为层流,且为不可压缩流体。
- 4) 等离子电弧是光学薄的,其辐射热损耗仅为温度的函数,故近似地可用单位体积辐射功率表示。
- 5) 忽略等离子电弧的重力以及黏性耗散。

4 仿 真

由于烧蚀油膜激发形成光谱这一个过程涉及多个物理场的相互作用,多个物理场之间相互耦合影响,而且激发过程时间短,研究状态在短时间内急剧变化,导致实验过程的中间变量难以准确地观测和捕捉,给实物实验造成了巨大的不便。故而采取数值仿真的方法来较为精准地展现这一过程。采用数值模拟技术,可以快速实现产品优化和迭代,极大地降低研发的成本,减少了制造开发测试样机的繁杂步骤^[15]。本文采用的仿真软件为 COMSOL Multiphysics,这是一款优秀的多物理场仿真软件,采用有限元法,内含多个接口和预设多个物理场,能够模拟出所研究电弧激发这一复杂变化过程。

4.1 仿真模型构建

该结构根据旋转电机的转子半径以及整个装置的尺寸综合判断,采用两个外直径为 $25\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、内直径为 $8\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、厚度为 $5\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 的转盘电极。

鉴于三维模型仿真所耗时间过长且不容易收敛,本文只构建了二维模型进行仿真。所构建的二维模型如图 4 所示。

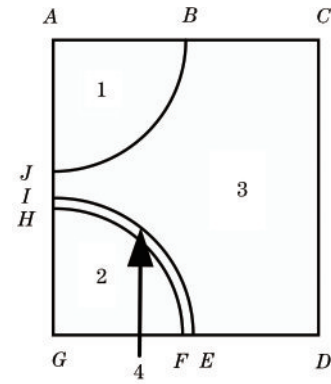


图 4 二维轴对称模型结构图

Fig. 4 Structural diagram of two-dimensional axisymmetric model

整个仿真模型采用二维轴对称形式,AG 为对称轴,矩形 ACDG 为整个仿真的求解域,其大小为 $28\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 。扇形 ABJ (域 1)、FGH (域 2) 为转盘石墨电极,其半径为 12.5 mm 。环带 EFHI (域 4) 为油膜,其厚度为 0.5 mm 。其他区域 BCDEIJ (域 3) 为空气。

4.2 设置边界和物理场的条件

边界条件和物理场的条件设置如表 1 所示。

表 1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

Field	Boundary condition	Conservation condition	Initial value
Electric	AB is 0, FG is 100 V, BCDE: electrical insulation	Law of conservation of current	0 V
Magnetic	ABCDEFG: magnetic insulation	Ampere's law	0 Wb/m
Thermal	ABCDEFG: thermal insulation	Conservation of mass, energy, and momentum	293.15 K
Flow	1) Two kinds of fluids with different properties, air, and lubricating oil	N-S equation	1 atm (1 atm = 101325 Pa)
	2) BJ, EI: no sliding wall conditions		
	3) BCDE: outlet		

4.3 网格划分

由于研究的重心在于滑油激发所形成的电弧,故对流体域(空气和油膜)进行了较为稠密的网格划分。基于仿真时间和收敛性能两方面考虑,对转盘电极部分则只进行了较为粗化的划分,此外对转盘边界和油膜边界等梯度较大的边界进行了更为细密的网格划分。通过以上的网格划分方法保证了仿真的精度和效率。整个二维模型的网格划分如图 5 所示。

依照上述步骤依次设置好几何模型、材料参数、各物理场的边界条件以及求解器的相关设定,对双转盘二维轴对称模型进行仿真。将得到的数据通过后处理可以更加清晰地发现所研究的变量对电弧激发的影响。

整个电弧激发的过程同时也包含了自然对流、传

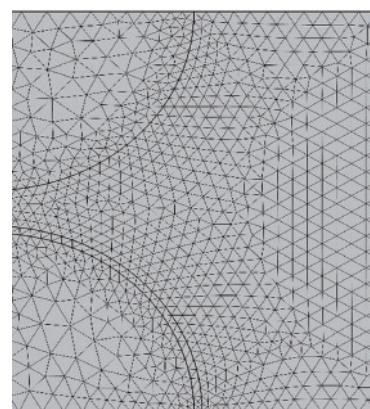


图 5 二维轴对称模型结构的网格划分

Fig. 5 Grid division of two-dimensional axisymmetric model structure

导和辐射三种热量的散失。为保证自然对流模拟计算的准确性,计算面积必须设置足够大,该仿真计算区域是经过前期多轮仿真实验迭代出的现有条件下的最优求解范围。

4.4 影响电弧激发的因素

影响激发效果的主要因素有外加激励、电极半径、电极间隙、转盘转速、润滑油的基本性质(如黏度、介电常数等)、油膜厚度。其中转盘转速、润滑油的基本性质主要影响油膜厚度大小进而影响激发的最终效果,故两者叠加表现为油膜厚度的影响^[16]。本文选取的评级指标为引燃电弧所需要的时间,即引弧所需的时间越短则表示激发的效果越好。同时选取电弧激发的瞬时温度作为辅助指标,在一定条件范围内,激发温度越高,润滑油样品的蒸发效果越好。

由于电弧激发是通过存储一定量的电能后释放将“空气-油膜”击穿的过程,故可以将其等效为电容先积蓄电能后释放击穿。将双转盘电极结构进行微分,产生电弧的瞬间可以看作是两个平行板电容击穿,则可将其进一步等效为平行板电容器。将整个电弧激发的装置可以等价如图 6 所示的电路图

图 6 中 V 是外加激励, R 是整个装置全部的电阻, C 为平行板电容器,其表达式为

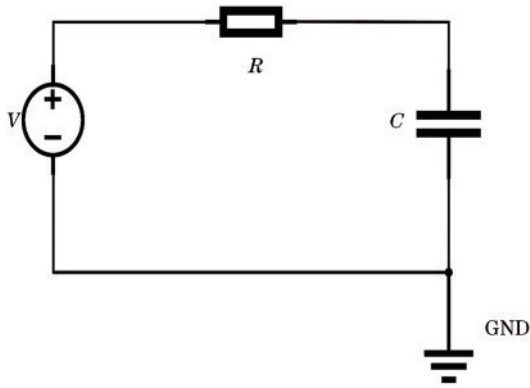


图 6 电弧激发模型等效电路结构

Fig. 6 Equivalent circuit structure of arc excitation model

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi k d}, \quad (3)$$

式中: ϵ 为平行板间物质的介电常数; S 为两板正对的有效面积; k 为静电力常量; d 为两平行板之间的距离。电阻和电容串联,将电容所分得的电压记为 U_c ,则电容存储的能量为

$$A = \frac{1}{2} C U_c^2. \quad (4)$$

在电弧激发并稳定燃烧过程中,会进行大量散热,包括热传导、热对流、热辐射三种形式,将这部分损失的热量记为 Q ,则真正维持电弧激发的能量为

$$q = A - Q. \quad (5)$$

这部分能量使得“空气-油膜”击穿产生电弧,期间上升的温度为

$$T = T_0 + \frac{q}{cm}, \quad (6)$$

式中: T_0 为初始温度,即室温; c 为“空气-油膜”混合物的比热容; m 为所研究范围内混合物的质量。 c 和 m 变化相对较小,可基本视为常数。通过以上的等效分析可以得到影响电弧激发温度的粗略表达式为

$$T = T_0 + \frac{\frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{4\pi k d} U_c^2 - Q}{cm}. \quad (7)$$

当油膜厚度增大时,主要影响 ϵ 并使其增大,导致温度升高。当外加激励增大时,使得 U_c 增大,导致温度升高。电极间隙增大时,使得 d 增大,导致温度下降。电弧激发是一个极其复杂的过程,包括多场耦合、多参数变化,经过上述等效模型可以大致判断出几个影响因素对电弧激发温度的影响,但如需更进一步地判断则要结合数值仿真和实物实验来探究其内在规律。

4.4.1 模型改进对电弧激发的影响

由图 7 可知,产生电弧的温度场受到电极形状的影响,其整体呈现包裹棒电极的形态,且温度从中心沿着径向逐渐减小。通过改变不同的激发条件,进行多次重复性仿真后,棒转盘结构平均在 3.6 ms 开始产生

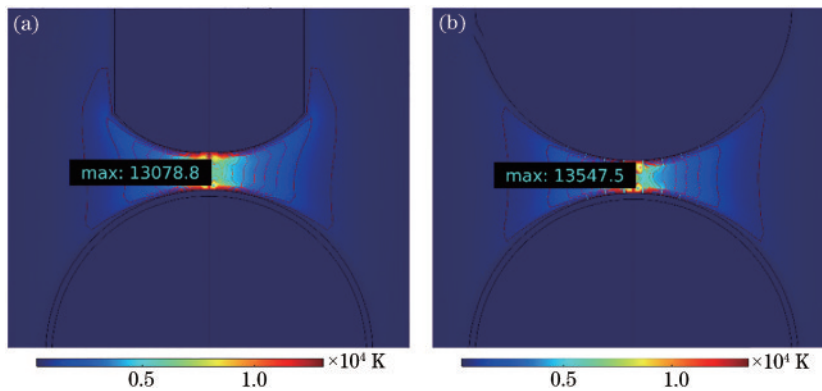


图 7 棒转盘模型和双转盘模型电弧激发温度对比。(a)棒转盘电极激发瞬时温度;(b)双转盘电极激发瞬时温度

Fig. 7 Comparison of arc excitation temperature between rod turntable model and double turntable model. (a) Instantaneous excitation temperature of rod turntable electrode; (b) instantaneous excitation temperature of double turntable electrode

电弧,而双转盘结构平均在 2.7 ms 就开始产生电弧,效率提升了 25%。激发温度提升了大约 500 K,这是由于装置改进带来的微小优势,而非实验过程中的重复性造成的误差。说明双转盘模型可以在更短的时间内将油液进行充分的燃烧和激发,效率更高。其原因可能是上下两个转盘都在旋转,使得滑油铺开更加平展,油膜厚度变薄,与电极的接触面积更大,而且电极磨损的程度很小使得电极间隙基本不变,在更短的时间内实现激发。图 8 为棒转盘电极结构实物实验装置,电极间隙产生的电弧,中心明亮且温度较高,与仿真具有很好的一致性。由图 9 和图 10 对比可知,棒电极相较于盘电极磨损明显,而且棒电极中心表面产生了烧蚀状的凹凸坑迹,电极间隙改变明显,对电弧燃烧的稳定性有很大影响。此外在更短的激发时间内,产生了更高的电弧温度,有利于油液进行充分烧蚀,为后续光谱正确采集提供了保障。虽然时间和温度两个指标没有明显提升,主要是前期两个装置在结构上的差异性不能得到很好的体现,但是随着检测样品的增多,棒电极持续磨损,电弧激发的效果显著性下降,电极间



图 8 棒转盘电极装置实验图
Fig. 8 Experimental diagram of rod turntable electrode device



图 9 棒电极磨损图
Fig. 9 Rod electrode wear diagram



图 10 转盘电极磨损图
Fig. 10 turntable electrode wear diagram

隙变大,出现了断弧的不良现象。

4.4.2 油膜厚度对电弧激发的影响

分别选取了油膜厚度为 0.2、0.5、0.8、1.0、1.5 mm 进行实验。由图 11 可知,随着油膜逐渐变厚,电弧激发所需要的时间逐渐变短,且呈现负相关趋势。其原因是油膜变厚,使所要击穿导通的空气厚度减小,故在相同条件下激发产生电弧的时间变短。同时,由于滑油的导电系数大于空气的导电系数,从而使“油膜-空气”这一混合层间隙的导电率增大,故电弧激发所用的时间变短。同时可以看出,随着油膜厚度的增加,电弧激发时的瞬时温度呈倒“几”字型,即先减小后增大。说明较薄的油膜可以有效地阻碍电弧激发的效果,但到达一定厚度,滑油渗入石墨电极内,增强了石墨电极的导电性质,且后者影响因素大于前者油膜的影响,故导致电弧激发的瞬时温度提高。

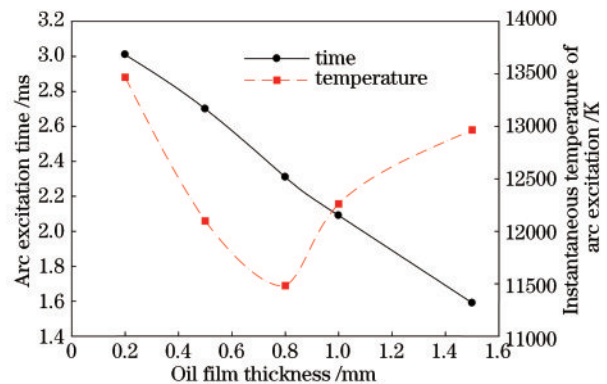


图 11 油膜厚度对电弧激发的影响
Fig. 11 Effect of oil film thickness on arc excitation

再分析转盘转速对电弧激发的影响。转盘转速增加后,油膜液滴平均直径减小,油滴从空气吸收了更多热量,导致油滴沉积成的油膜温度升高,同时加剧了空

气的流动导致热量散失加快,不利于电弧的持续稳定燃烧。转盘电极的转速增大,产生更大的离心力带动附着于电极表面的油膜,沿着转盘边缘扩散、平铺、延展,进而导致油膜变得更薄^[17],间接影响了油膜的厚度,故转盘电极转速对电弧激发的影响和油膜厚度对其的影响机理相似,但呈现负相关表现。

4.4.3 外加激励对电弧激发的影响

由图 12 可以看出,随着外加电压的增加,电弧激发所需要的时间逐渐变短。其原因可能是因为激发温度的升高,导致了润滑油黏度的下降,进而使得油膜变薄,阻碍激发的效果减弱。同时可以看出,随着电压的增加,电弧激发减少的时间逐渐变缓。说明,外加激励的作用范围只在一定区域有显著作用,即温度对润滑油黏度的影响只在一定范围内有明显作用。同时可以看出,随着电压的增大电弧激发瞬时温度再逐渐升高,升高的速率是先快接着趋于平缓之后又变快。再结合低功率、低能耗的需求,外加激励为 100 V 为最优条件。

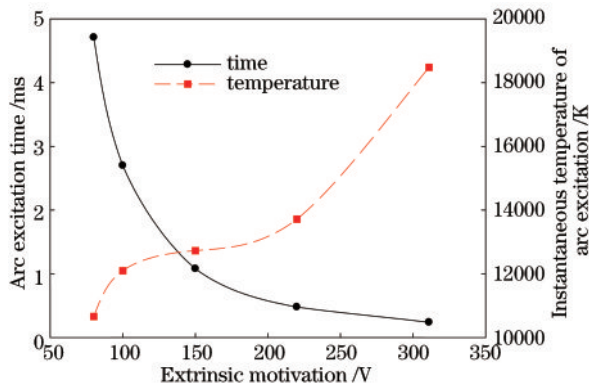


图 12 外加激励对电弧激发的影响

Fig. 12 Effect of extrinsic motivation on arc excitation

4.4.4 电极间隙对电弧激发的影响

由图 13 可以看出,随着电极间隙的增大,电弧激发所需要的时间变长。其主要原因是间隙变大,相当于空气电阻串联增大,故在其他条件不变时,电弧激发所需的时间变长。从另一个角度来说,电极间隙增加,

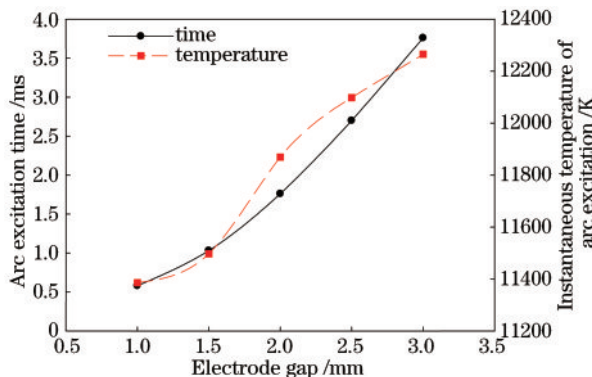


图 13 电极间隙对电弧激发的影响

Fig. 13 Effect of electrode gap on arc excitation

意味着所产生的电弧的长度变长。在相同的外加电压条件下,如果要维持更长的电弧,则需要保证电弧表面的温度更高,否则无法维持形成有效电弧。温度越高,电弧的热阻越小,流过电弧的电流一定会增大。同时可以看出,随着激发时间的延长,电弧激发所需要的温度也越来越高。

5 结 论

本文主要结论如下:

1) 与“棒-转盘”模型相比,双转盘模型的优势在于,上端旋转的转盘可以有效地减少棒电极尖端一个点的持续磨损,进而避免了多次电极更换可能带来的人工误差,放电时电极间隙长度稳定,更有利于电弧的激发。双转盘结构相较于“棒-转盘”结构,电弧激发时间减少了 25%,同时激发温度更高,提高了大约 500 K,也更有利于油液的充分燃烧。说明基于双转盘结构的检测方法有很高的应用价值,尤其是针对大样本样品的检测,其重复性和稳定性有了显著提升。

2) 通过 COMSOL 仿真得到的影响曲线可知,油膜对于电弧的激发是一种阻碍作用,阻碍效果是先增大后减小。过薄的油膜所含滑油颗粒的信息量较少,过厚的油膜难以形成且需要更高的激发温度,从电极转速和滑油性入手选取合适的油膜厚度对电弧激发效果有显著性提高。外加激励与电弧激发呈正相关,激励越大,激发效果越好,但是过高的激励会带来能耗和散热的负担。电极间隙对电弧激发呈负相关,间隙越大,越难激发。但是电极间隙越小,不利于油膜厚度的增加。对参数的优化,需要结合整个系统进行综合判断。

3) 在已经进行的仿真实验中通过优选法,即通过分析上述探究的三个影响电弧激发的条件,电源选用 220 V 的交流电压之后逆变为 100 V 的直流电源在功率和激发效果方面可以达到最佳的平衡。而油膜影响的因素权重又大于电极间隙影响的权重,主要原因是当外加激励确定时,电极间隙的大小也随之确定。电弧激发主要是用来通过烧蚀油液中的颗粒来产生光谱进而判断元素的种类和含量,故可以认为电极间隙的作用主要是两个:一个是提供合适的激发空间;另一个是容纳合适的油膜厚度。故在一定条件范围内,油膜厚度占电极间隙厚度的比重越大,散失的能量越少,激发的效果越好。综上所述,并结合仿真实验可以选取出激发效果最好的条件为:采用双转盘电极结构,油膜厚度为 1 mm,外加激励为 100 V,电极间隙为 1.5 mm。

参 考 文 献

- [1] Vähöja P, Välimäki I, Roppola K, et al. Wear metal analysis of oils[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2008, 38(2): 67-83.

- [2] 闫书法, 朱元宸, 陶磊, 等. 基于信息熵的机械传动油液光谱监测数据选择方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(8): 2637-2641.
Yan S F, Zhu Y C, Tao L, et al. Spectral oil condition monitoring data selection method for mechanical transmission based on information entropy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(8): 2637-2641.
- [3] 周娜, 黄宇斐, 许少凡. 油液在线监测与离线检测的互补性分析[J]. 设备管理与维修, 2022(13): 113-114.
Zhou N, Huang Y F, Xu S F. Complementarity analysis of oil on-line monitoring and off-line detection[J]. Plant Maintenance Engineering, 2022(13): 113-114.
- [4] 郑国经. 原子发射光谱仪器的发展、现状及技术动向[C]//2017年中国光谱仪器前沿技术研讨会论文集. 长沙: 现代科学仪器编辑部, 2017: 29-42, 47.
Zheng G J. Development, present situation and technical trend of atomic emission spectrometer[C]//Proceedings of the 2017 China Spectrometer Frontier Technology Seminar. Changsha: Editorial Department of Modern Scientific Instruments, 2017: 29-42, 47.
- [5] 袁朝辉. 基于原子发射光谱的油液磨粒检测技术[J]. 设备管理与维修, 2013(S1): 66-68.
Yuan C H. Detection technology of oil abrasive particles based on atomic emission spectrometry[J]. Plant Maintenance Engineering, 2013(S1): 66-68.
- [6] 王凯. 油液监测技术的发展及其在设备管理中应用[J]. 设备管理与维修, 2018(22): 187-189.
Wang K. Development of oil monitoring technology and its application in equipment management[J]. Plant Maintenance Engineering, 2018(22): 187-189.
- [7] 周亚斌, 马国梁, 张继勇. 在用润滑油中元素光谱分析方法对比研究[J]. 润滑油, 2017, 32(1): 33-35.
Zhou Y B, Ma G L, Zhang J Y. Comparison research of elements analysis by spectroscopic methods in service oil [J]. Lubricating Oil, 2017, 32(1): 33-35.
- [8] Lukas M, Anderson D P. Rotrode filter spectroscopy - a new method for multielement analysis of particles in used oil samples[J] Proceedings of the XI NCIT, 1995: 334-342.
- [9] 郎宏, 佟文伟, 何山, 等. 基于光谱分析技术的磨损故障监测影响因素分析[J]. 航空发动机, 2013, 39(3): 84-88.
Lang H, Tong W W, He S, et al. Analysis of influence factors on wear failure monitoring based on spectral analysis technology[J]. Aeroengine, 2013, 39(3): 84-88.
- [10] 张刘刘, 裘燕青, 王成群, 等. 基于旋转圆盘电极法的原子发射光谱激发装置: CN201520753539.4[P]. 2016-02-10.
Zhang L L, Qiu Y Q, Wang C Q, et al. Atomic emission spectroscopic excitation device based on rotating disk electrode method: CN201520753539.4[P]. 2016-02-10.
- [11] 张鑫晓, 段发阶, 傅骁, 等. 用于电弧发射光谱的数字化自动引弧电路设计[J]. 仪表技术与传感器, 2022(1): 38-44.
Zhang X Y, Duan F J, Fu X, et al. Design of digital automatic arc ignition circuit for arc emission spectrum[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(1): 38-44.
- [12] 朱春阳, 董智明, 李灏. SPECTROIL M型油料原子发射光谱仪性能评定[J]. 设备管理与维修, 2018(8): 186-189.
Zhu C Y, Dong Z M, Li H. Performance evaluation of SPECTROIL M-type fuel atomic emission spectrometer [J]. Plant Maintenance Engineering, 2018(8): 186-189.
- [13] 张济楠, 何建萍, 王晓霞, 等. 微束等离子弧焊电弧温度场的数值模拟[J]. 焊接技术, 2016, 45(5): 7, 34-37.
Zhang J N, He J P, Wang X X, et al. Numerical simulation of temperature field distribution of micro plasma arc in MPAW[J]. Welding Technology, 2016, 45(5): 7, 34-37.
- [14] Jian X X, Wu C S. Determination of arc pressure and current density on the molten pool surface in plasma arc welding[J]. China Welding, 2014, 23(3): 78-82.
- [15] 郭军, 刘金超, 贾阳, 等. 基于COMSOL旋转机械电机的电力电磁耦合分析[J]. 制造业自动化, 2012, 34(17): 53-56.
Guo J, Liu J C, Jia Y, et al. Simulation analysis of rotating machine alternator based on finite element analysis software COMSOL[J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(17): 53-56.
- [16] 付光晶, 张峰, 张士文. 基于COMSOL Multiphysics的交流故障电弧仿真研究[J]. 电器与能效管理技术, 2018(6): 23-29.
Fu G J, Zhang F, Zhang S W. Research of AC fault arc simulation based on COMSOL multiphysics[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(6): 23-29.
- [17] 陈薄, 王鼎铭, 古忠涛. 旋转圆盘表面油膜破碎转捩临界特性分析[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(5): 493-500.
Chen B, Wang D M, Gu Z T. Critical transition characteristics of disintegration of oil film on surface of a rotating disk[J]. Tribology, 2018, 38(5): 493-500.