

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2024.03.11

李国占,涂家润,崔玉荣,毕君辉,郝爽,刘文刚,周红英. 2024. NEPTUNE型质谱仪等离子体源的维护与故障分析[J]. 华北地质, 47(3):98-105.
LI Guozhan, TU Jiarun, CUI Yurong, BI Junhui, HAO Shuang, LIU Wengang, ZHOU Hongying. 2024. Maintenance and breakdown analysis of Neptune mass spectrometer plasma source[J]. North China Geology, 47(3):98-105.

NEPTUNE型质谱仪等离子体源的维护与故障分析

李国占¹, 涂家润^{1*}, 崔玉荣², 毕君辉¹, 郝爽¹, 刘文刚¹, 周红英¹

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170;

2. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055)

摘要:【研究目的】多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)的离子源属常压、高温电离源,由多个精密、复杂元器件组成,是MC-ICP-MS的重要部件,加强其日常维护与故障分析是十分必要的。【研究方法】本文以赛默飞世尔科技有限公司的NEPTUNE型MC-ICP-MS为例,阐述其等离子体源故障、电子故障、真空故障、气路故障、循环水故障等。其中等离子体源点火故障最为常见,影响因素复杂,作为阐述重点。【研究结果】在详细介绍ICP工作原理和它各部件维护经验基础上,详细总结归纳此仪器点火过程中出现的故障现象及处理方法。【结论】重视对等离子体源的日常维护与故障分析,能大大提高Neptune的利用率,同时也为获取高质量的测定数据提供保障,也对仪器使用、维修提供参考、借鉴。

关键词: 等离子体; 部件维护; 故障现象; 解决方法

创新点: ICP作为MC-ICP-MS的关键核心部件,加强其日常维护与故障分析,对提高大型精密贵重仪器设备利用率与保障获取高质量测定数据具有重要现实意义。

中图分类号: TH843

文献标志码: A

文章编号: 2097-0188(2024)04-0098-08

Maintenance and breakdown analysis of Neptune mass spectrometer plasma source

LI Guozhan¹, TU Jiarun^{1*}, CUI Yurong², BI Junhui¹, HAO Shuang¹,
LIU Wengang¹, ZHOU Hongying¹

(1. Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center of Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China;

2. Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China)

Abstract: This paper is the result of maintenance the instrument.

[Objective] The Inductively coupled plasma source (ICP) in the multi-collector Inductively coupled Plasma Mass Spectrometer (MC-ICP-MS) is a kind of high temperature ionization source under atmospheric pressure, which is produced by the interaction of

收稿日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目“高铀矿物飞秒激光剥蚀-同位素稀释热电质谱U-Pb定年研究(42103025)”、“高钍低铀矿物高精度同位素稀释——热电质谱钍-铅年代学研究(42073055)”、“铀钍矿微区原位U-Pb同位素定年标准物质的研制(41873066)”；中国地质调查局地质调查项目(DD20190439)

作者简介: 李国占(1979—),男,高级工程师,测控技术与仪器专业,现主要从事质谱仪维修专业, E-mail: 13612130989@139.com。

***通讯作者:** 涂家润(1986—),男,博士,高级工程师,分析化学专业,现主要从事同位素地质年代学及地球化学研究工作, E-mail: jrtu@mail.nankai.edu.cn。

several sophisticated components and is an important component of MC-ICP-MS, The Plasma Generation Process of the Mass Spectrometer is mainly performed by the ICP. It is necessary to strengthen its routine maintenance and failure analysis. **[Methods]** Taking the MC-ICP-MS(NEPTUNE) of Thermo Fisher Scientific as an example, This type of mass spectrometer mainly has plasma source fault, electronic fault, vacuum fault, gas support fault, circulating water support fault, etc. among which plasma source ignition fault is particularly common, and the influencing factors are complex. **[Results]** On the basis of a detailed introduction to the working principle of ICP and the maintenance experience of each of its components, the fault phenomena and treatment methods in the ignition process of this instrument are summarized in detail. **[Conclusions]** Pay attention to the routine maintenance and failure analysis of the plasma source can greatly improve the utilization of Neptune and ensure the acquisition of high-quality measurement data. It provide reference for the use and maintenance of the instrument.

Key words: ICP; maintenance component ; failure phenomena; solutions

Highlights: ICP is the key core component of MC-ICP-MS, it is important to strengthen its daily maintenance and analysis the fault, which is of great practical significance to improve the utilization rate of large precision and valuable instruments and equipment and ensure the acquisition of high-quality measurement data.

About the first author: LI Guozhan, male, born in 1979, major in measurement and control technology & instrument, currently engaged in mass spectrometer repairs. E-mail: 13612130989@139.com

About the corresponding author: TU Jiarun, male, born in 1986, major in analytical chemistry. E-mail: jrtu@mail.nankai.edu.cn

Fund support: Supported by the projects of National Natural Science Foundation of China (42103025, 42073055, 41873066) and the projects of China Geological Survey (DD20190439)

多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)是高精度分析元素及其同位素组成的仪器,在地质科学、环境科学、生命科学、材料科学、空间探测、考古、冶金、能源、化工等领域发挥着重要影响。其中,Neptune系列质谱仪在国内外实验室拥有较高占有率。ICP作为MC-ICP-MS的关键核心部件,日常的维护与故障分析对提高仪器设备利用率与保障获取高质量测定数据具有重要现实意义。中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室的MC-ICP-MS是赛默飞世尔科技(Thermo Fisher Scientific)公司生产的Neptune系列,与193 nm激光器联用,可用于含铀矿物的微区原位U-Pb同位素和锆石Lu-Hf同位素检测。至目前为止,该仪器已平稳运行十多年,为国内众多高校和科研院所提供了大量的高质量的测试数据(连光辉等,2023;涂家润等,2019;张金国等,2022;康健丽等,2022)。

为获得高质量的样品测试数据,这对分析仪器的使用和管理人员能力提出了更高的要求,一方面要加强仪器日常维护和保养,保证仪器良好的运行状态;另一方面要在仪器出现问题时,能准确找出故障点,顺利排除故障,确保仪器正常运行。国内已有关于电感耦合等离子体质谱仪维修方面的文献报道(唐兴伟,2020;刘静波等,2017;李凤春等,

2016),虽然近年来国内的Neptune系列质谱仪市场占有率较高,并应用到各个领域(唐索寒等,2016;段明等,2021;李志丹等,2021),但针对Neptune系列质谱仪的故障维修却鲜有介绍。

1 ICP简介

1.1 ICP的组成

Neptune型质谱仪的核心部件是电感耦合等离子体(ICP),是耗材的“集中地”。由ICP炬室、高频发射器、感应线圈、匹配箱、XYZ方向驱动马达、供气系统组成(图1),需要在接口与接口泵的配合下产生电感耦合等离子体(简称“点火”)。连接方式有两种(李国占等,2019),本文着重对激光烧蚀系统联用展开分析。

1.2 ICP工作原理

此仪器操作软件中ICP点火的示意简图见图2,右侧框中显示的是接口部件和接口泵,接口部件包括采样锥、截取锥、闸板阀。ICP工作原理简图见图3,数模转换控制电路控制各个流量计,将各路气体按操作软件需求传送到ICP炬室。频率为27.12 MHz的高频发射器持续提供能量,经过匹配箱完美匹配后传给感应线圈。当有高频电流通过线圈时,产生轴向磁场,这时若用高频点火装置产生火花,形成的载流子(离子与电子)在电磁场作用下,与原

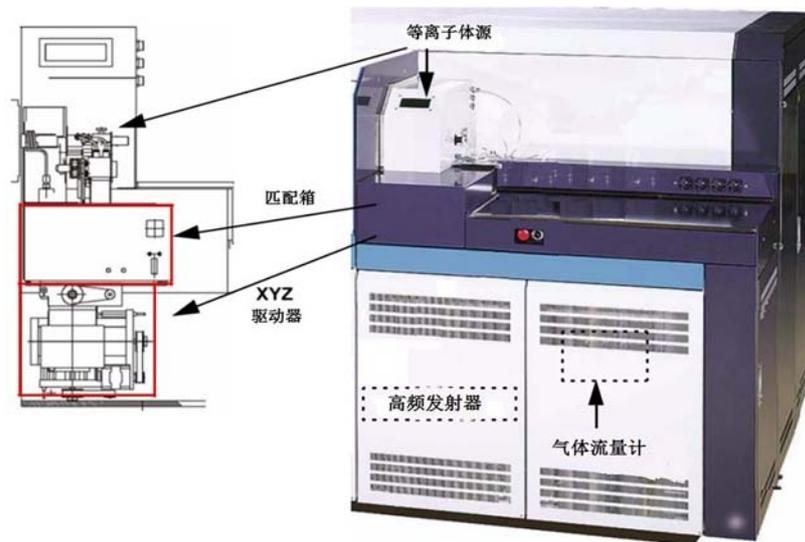


图1 ICP的组成

Fig.1 The composition of ICP

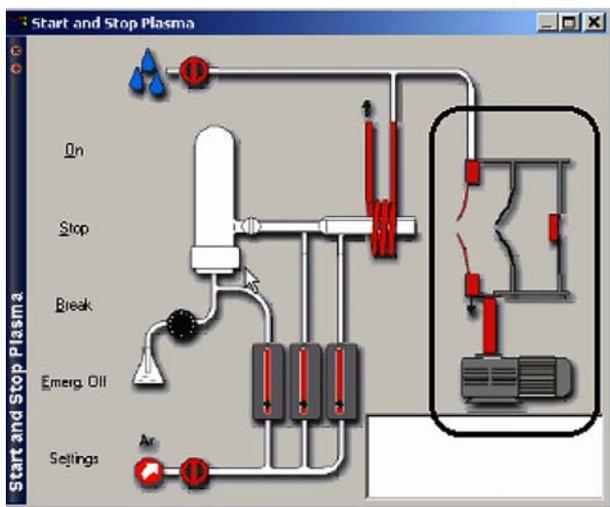


图2 ICP点火示意简图

Fig.2 ICP ignition schematic

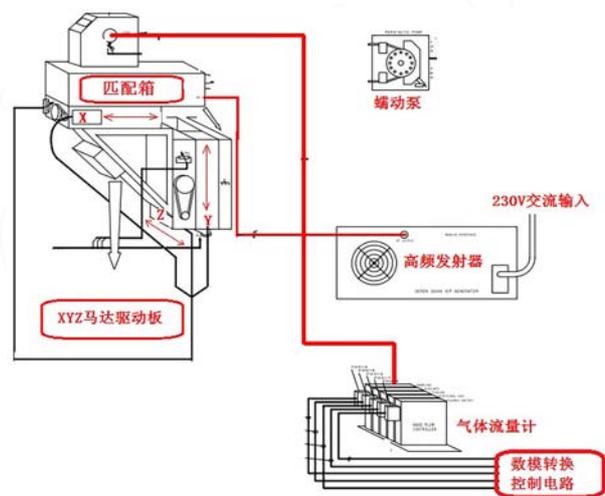


图3 ICP控制部件系统

Fig.3 ICP ignition schematic circuit

子碰撞并使之电离,形成更多的载流子,当载流子多到足以使气体有足够的导电率时,在垂直于磁场方向的截面上就会感生出流经闭合圆形路径的涡流,强大的电流产生高热又将气体加热,瞬间使气体形成最高温度可达 10 000 K 稳定的等离子炬。感应线圈将能量耦合给等离子体,并维持等离子炬。

2 ICP 部件维护

2.1 ICP 炬室的维护

ICP炬室包括等离子炬管,中心管、负载线圈、保护电极以及套管(图4)。

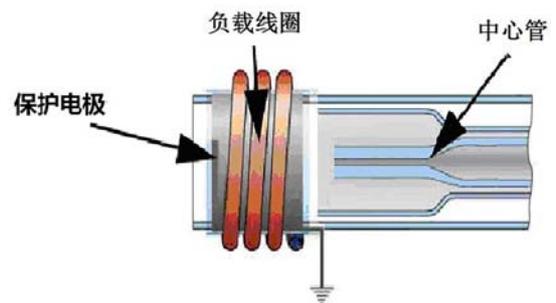


图4 等离子体炬管、负载线圈和保护电极示意图(据李国占等,2019)

Fig.4 The sketch map of plasma torch, load coil and guard electrode

2.1.1 等离子炬管的维护

等离子炬管由高纯度的石英材料精密加工而成,在经过长时间使用后可能会在末端位置变色,主要是一些无机盐沉积(图5)。视使用强度,每隔一周要检查炬管的工作状态,看有无变色、变形或沉积情况。如果炬管发生变色情况,须拆下清洗,清洗时可先将中心管取下,用王水($\text{HNO}_3:\text{HCl}=1:3$)浸泡约5~6h或更长时间浸泡(唐兴伟,2020)或用热王水煮沸炬管,或将其拆下放到硝酸(1%)溶液中进行超声清洗(刘静波等,2017),再用去离子水进行清洗最后用去离子水充分清洗,炬管洗净后可自然晾干或用吹风机吹干后使用,清洗时间可根据洁净程度而定。如果炬管由于高温发生变形或裂口,须更换新的炬管。

2.1.2 中心管的维护

长时间使用的中心管(图6),由于大量测试样品的气溶胶经过中心管,长时间会在内壁少量沉积,为了避免影响仪器各元素的背景等效浓度,也需每个月清洗一次。安装时注意检查中心管周围O型圈的密封,应尽量插到炬管的底部。如果载气(氩气)或样品气加载不上时,但是在空载时能顺利加上载气,可能

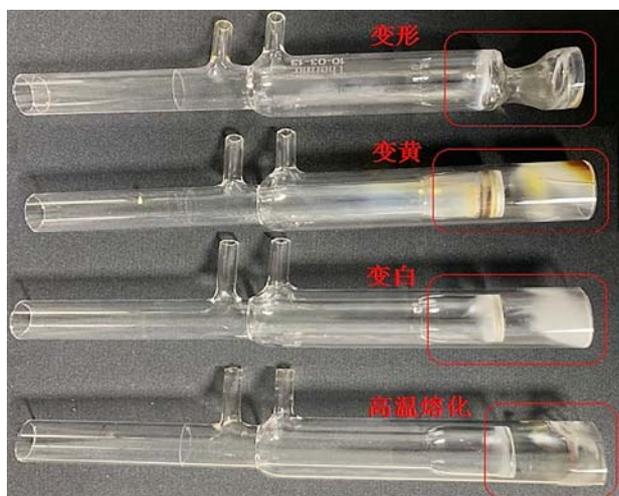


图5 炬管
Fig.5 Torch



图6 末端烧结的中心管
Fig.6 Sintered end of Injector

中心管末端出现烧结的现象,需更换新的中心管。

2.1.3 负载线圈的维护

负载线圈一般情况下不需要维护,其内部为中空,点火时,通入冷却水将其冷却。平时检查冷却水接口,做到不漏水,不堵塞,保证制冷效果。

2.1.4 保护电极的维护

为了消除产生的电位差,在负载线圈和等离子炬管之间加装接地保护电极(图7)(李国占等,2019)。一旦工作气体不纯或点火系统漏气,高温等离子体火焰在氧气的作用下迅速烧毁保护电极,若其损耗严重(图8),需更换新的保护电极。

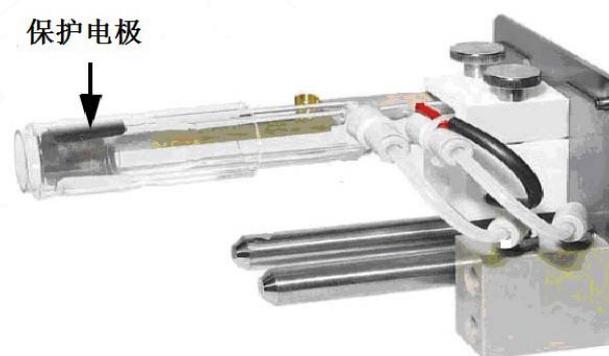


图7 保护电极在炬管中的位置
Fig.7 The position of guard electrode on the plasma torch

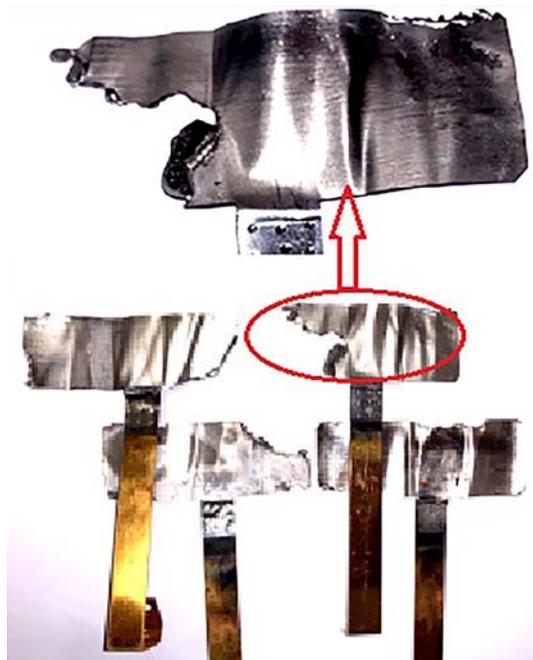


图8 损毁的保护电极
Fig.8 Damaged guard electrode

2.1.5 套管的维护

套管是套在炬管末端,对保护电极起到固定并隔离点火线圈的作用,也是由高纯度的石英材料精密加工而成。当保护电极损毁严重时,一般它的内壁也会附着大量黑色杂质,清洗方法与炬管相同。

2.2 高频发射器的维护

高频发射器是ICP的高频供电装置,为等离子体炬的点燃和维持输送稳定的高频电能。其频率为27.12 MHz,冷却方式有两种:水冷和风冷。水冷:温度范围5~30°C,水最大压力60 PSI。风冷:空气流量为:130 CFM(立方英尺每分钟),其中1CFM=0.028 3 M³/min。两种冷却方式各有优缺点:水冷,安全,噪音小,温度变化范围小,成本低。缺点是受制于水冷机和水的洁净度,一旦堵塞将大大降低冷却效率;风冷的优点是原理简单,而其缺点是噪音大,降温效率易受环境温度影响大。在炎热的夏季,如果使用的是风冷模式的高频发射器,偶尔会因为高频发射器过热保护而熄火,此时若要继续工作,需配备一台大功率风扇。通常,Neptune型质谱仪用的是水冷模式的高频发射器。

2.3 匹配箱的维护

高频发射器输出功率在100~1 600 W可调,输出阻抗为50 Ω。而等离子体的阻抗只有0.5~1.5 Ω,为了满足产生并维持等离子体的要求,需使高频发射器的输出阻抗与负载阻抗匹配,从而提高其能量的传输效率,因此需要在高频发射器和负载线圈之间插入阻抗匹配系统(游小燕等,2014;王超等,2010)。

匹配箱负责等离子体内部的能量和传递给负载线圈的能量之间的平衡。通过同轴电缆与高频发射器连接。无论等离子体负载如何变化,它都能将不匹配的等离子体阻抗自动转换为50 Ω。匹配箱价格昂贵,不需要日常维护。如遇仪器故障,频繁进行点火操作,会对匹配箱和高频发射器造成损伤,缩短其使用寿命。

2.4 XYZ方向驱动马达的维护

XYZ方向驱动马达由三个立体坐标方向的精密驱动马达组成,操作电脑软件分别控制其运动方向,从而带动等离子源前后、左右、上下精确移动。驱动马达由驱动电路供电,无需日常维护。

2.5 供气系统的维护

维持等离子体源正常工作的的气体有冷却气、辅助气、样品气和载气(周亮亮等,2017),气体的通断通常由电磁阀控制,前三种气体均为氩气,在等离子体工作过程中起到不同的作用;载气一般为高纯氦气。其流速均由各自的流量计分别控制,冷却气体流量必须大于10 L/min,辅助气体流量必须大于0.6 L/min。否则,等离子体就无法维持。

2.6 接口的维护

接口(岳东宁,2016;岳东宁等,2017)是ICP和质谱仪分析管道的连接区域,是重要部件之一,一般由采样锥和截取锥和闸板阀组成(图9)。大气压下,电离后的等离子体通过采样锥和截取锥,在闸板阀开启状态下进入分析管道中。

2.6.1 闸板阀的维护

接口配有气动的闸板阀,活塞前端的圆孔与接口的圆孔重合时,阀门打开,两圆孔完全错开后,阀门关闭。阀门能正常开闭,完全靠涂抹高真空树脂的橡胶圈来维持良好的真空度。以前橡胶圈是圆实心的,近年来改成了中间有凹槽的形状(图10)。这样设计的好处:1)拆装更容易;2)金属碎屑等颗粒物附着在橡胶圈表面而影响真空的概率大大降低。在橡胶圈上均匀涂抹高真空树脂,可彻底解决阀门开启困难问题(李国占等,2019)。



图9 接口

Fig.9 The Interface

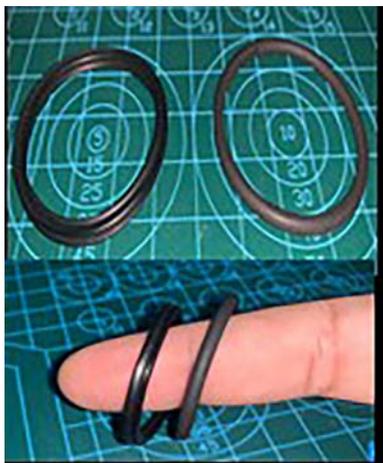


图10 两种类型的橡胶圈

Fig.10 Two types of rubber rings

2.6.2 锥的维护

锥按用途可分为采样锥和截取锥(Spencer R L et al., 2009; 杜世刚, 1998; 贾美清, 2009)。正常情况下,采样锥的锥孔直径是1.0 mm,截取锥的直径是0.8 mm。其中采样锥有两种:standard型和Jet型;截取锥有两种:X型和H型(图11)。Jet型采样锥和X型截取锥的组合能明显提高测试的灵敏度(HU et al., 2012)。按材质可分为铝锥、镍锥、铜锥和铂锥,其中常用的是镍锥。

采样锥和截取锥是最容易被堵塞和腐蚀的,一般而言,采样锥孔的情况比截取锥更加明显。堵塞和腐蚀并不总是显而易见的,因为锥上堵塞物的积累和锥孔的腐蚀常常要经历很长的一段时间。因此采样锥和截取锥要定期检查和清洗(贾美清, 2009; 杨岳衡等, 2019)。锥的清洗方法有以下几种:

1)采用超声波在大约5%的专用洗涤液(如Citranox溶液)中清洗15 min,然后再用去离子水超声清洗15 min; 2)用专用的金属抛光粉(氧化铝

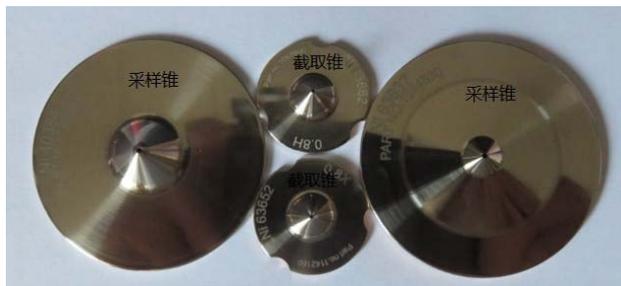


图11 采样锥和截取锥

Fig.11 The sample cone and skimmer cone

粉)和成泥状,用一块软布由内到外轻轻擦拭锥体内表面和外表面,再用超纯水反复冲洗,然后再放到1%~5%的硝酸中超声清洗2 min(唐兴伟, 2020); 3)可以用棉签蘸硝酸(2%)反复擦洗锥内外表面,除去表面沉积物,然后加入去离子水,超声15 min,烘干即可(刘静波等, 2017); 4)清洗时,分别用棉签蘸少量去离子水和3%的稀硝酸溶液擦拭锥面和锥孔各一遍,超声清洗5 min,再用去离子水清洗锥表面,然后用超声清洗5 min,最后用烘箱烘干(李国占等, 2019)。

对锥的维护,有几点需注意:1)清洁锥体时,不要用手触碰锥孔,要握住锥体的外围;2)平放锥时,务必锥口朝上,否则易造成锥孔变形;3)尽量不要使用有机溶剂清洁锥体;4)不要在纯水中存储锥体超过40 min,否则锥口可能被腐蚀;5)锥孔变大或非正圆形状时,须更换锥体。

石墨垫圈起到密封作用的。若刚更换过锥,点火后前级真空很差,应重新检查垫圈安装位置,或检查是否有旧垫圈残留,导致安装不平整而真空微漏。

2.7 接口泵的维护

接口泵是一台用于维持接口处较高真空度的大功率泵,正常工作时,转速约为60 000 r/min左右,工作电流约为3.1 A左右。如果转速明显偏低或电流偏大,说明真空系统存在漏气点。应迅速查明并修复漏气点,否则将影响泵的使用寿命。平时保养需每半年在泵的两侧向注油孔注油一次,以保证油液面高度在显示高度的80%以上(图12)。

3 ICP故障分析

ICP点火过程可以概括为三步(Lindner H, et al.,



图12 接口泵侧面

Fig.12 The Side of interface pump

2011; Houk R S, et al., 1980; Murphy A B, et al., 1994): 第一步是向炬管中通入氩气; 第二步将负载线圈输入频率为 27.12 MHz 高频电源, 此时线圈内有高频电流及由它产生的高频电磁场; 第三步由负载线圈产生火花放电, 提供与高频电磁场耦合的自由电子。自由电子从负载线圈产生的高频电磁场中获得足够的动能, 与氩原子碰撞时可将其电离, 从而产生更多的电子。重复上述过程, 进一步将等离子体加热, 最终形成明亮的放电。ICP 部件最常见的故障就是点火问题。表 1 总结了六大类 ICP 故障, 分析故障的可能原因(张庸等, 2014; 陈金发, 2021; 徐崇颖等, 2019; 苑国强等, 2015), 列出解决方案(李国占等, 2019)。

4 总结

多接收器电感耦合等离子体质谱仪是大型精密

仪器之一, ICP 部分是仪器的关键性部件, 定期检查各个部件的运行状态是保障仪器正常运转的关键, 尤其要掌握 ICP 的日常维护及对其点火故障分析与解决办法, 因此, 准确全面了解分析仪器各个组成部分的工作原理与维修维护方法是十分必要的。当相关类型仪器出现点火故障时, 可以参考表 1 中六大类等离子体点火故障原因分析以及排除方法。

中文参考文献

- 赵利刚, 王文龙, 高学生, 等. 2024. 内蒙古达茂旗北部包尔汉图群时代及早一中三叠世变质锆石年龄的启示[J]. 华北地质, 47(2): 1-16.
- 连光辉, 任云伟, 施建荣, 等. 2023. 华北克拉通北缘凉城基性岩墙成因及古地理的重建意义[J]. 地质学报, 97(4): 1295-1314.
- 涂家润, 崔玉荣, 周红英, 等. 2019. 锡石 U-Pb 定年方法评述[J]. 地质调查与研究, 42(4): 241-249.
- 张金国, 赵希林, 刘欢, 等. 2022. 浙江龙泉岩群新元古代—早古生代

表 1 ICP 点火故障分析
Table 1 The Analysis of ICP ignition failure

故障现象	故障原因	排除方法
无法开始进程	Torch 检测不到或位置不正确	检查安装是否到位 电路板是否正确接地 电路板故障
	“main gas”无响应	控制部件电源故障 气体流量计控制插头松动 无气体供应
进程后期失败	氩气压力小于 5Bar 或氩气不纯 冷却水温度高	增大气体供应压力或更换合格氩气 检查或维修水冷机或水冷机加水
	Skimmer valve 打不开 接口泵缺油, 运转异常 加载样品气时熄火	检查氩气压力或更换“O”型橡胶圈 检查泵两端的油液面, 及时补充 重新开始进程, 缓慢加入载气
点火成功后不能维持	Z 轴位置太偏左, 仪器保护 采样锥未安装好, 可能漏气或进样系统漏气	在软件中将 Z 轴位置设置在相对中间位置 检查石墨垫圈是否装好, 检查进样系统气密性
	高频发射器过热保护 氩气压力不稳或即将用尽 瞬间通入大量载气 实验室排风系统异常	检查冷却循环系统 检查氩气供气系统或更换新的气体 重新开始进程, 缓慢加入载气 检查排风系统
进程顺利完成, 但无火焰	反射功率高于 50 W; 屏蔽故障或高频电缆松动; 点火线接触不良	逐一排查高频发生器电源 将高频电缆装实 拔出炬管, 重接点火线
	高频发射器故障	修理或更换高频发射器
运行过程中 不明原因熄火	冷却水故障 高频发射器里面的 24V 电磁阀不能完全打开 真空不理想	检查水冷机运转情况及循环管路 检查 24V 电源或清洗阀体 真空系统漏气或真空泵故障
	氩气用光 重启前端计算机	更换新的氩气 重新点火
正常点火, 但灵敏度 低于正常值	接口处真空度低 接口泵故障	检查采样锥及机械泵 检查接口泵转速及工作电流
	中心管末端变形或部分融化; 增敏氩气压力不足	检查冷却气供气系统并更换中心管 检查供气系统

- 变沉积岩地球化学特征及其对华南构造演化的指示[J].地质通报,41(12):2202-2223.
- 康健丽,王惠初,陈枫,等. 2022. 山西云中山地区“界河口群”重新厘定[J]. 华北地质,45(02):37-50.
- 唐兴伟. ICP-MS的安装调试和日常维护的注意事项[J]. 环境与发
展,2020,32(04):231-232.
- 刘静波,张更宇. 2017. 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)在环境监
测领域日常维护及故障排除[J]. 中国无机分析化学,7(4):102-
108.
- 李凤春,侯明兰,栾日坚,等. 2016. 电感耦合等离子体质谱仪与激光
器联用测量条件优化及其在锆石 U-Pb 定年中的应用[J]. 岩矿
测试,35(1):17-23.
- 唐索寒,朱祥坤,李津,等. 2016. 用于多接收器等离子体质谱测定的
铁铜锌同位素标准溶液研制[J]. 岩矿测试,35(2):7.
- 段明,张祺,王国明,等. 2021. 大兴安岭乌兰哈达地区铀矿找矿进展
与找矿预测[J]. 华北地质,2021,44(02):58-66
- 李志丹,谢瑜,李俊建,等. 2021. 华北地区锂资源特征及成矿规律概
要[J]. 华北地质,44(03):41-49.
- 李国占,郝爽,王家松,等. 2019. 浅谈多接收器电感耦合等离子体质
谱仪的日常维护[J]. 地质调查与研究,42(4):271-277.
- 游小燕,郑建明,余正东. 2014. 电感耦合等离子体质谱原理与应
用[M]. 化学工业出版社.
- 王超,金星,石宝松,等. 2010. ICP光源中负载匹配箱的设计[J]. 现
代制造工程,(9):132-134.
- 周亮亮,魏均启,王芳,等. 2017. LA-ICP-MS工作参数优化及在锆
石 U-Pb 定年分析中的应用[J]. 岩矿测试,36(4):350-359.
- 岳东宁. 2016. 电感耦合等离子体质谱仪离子源特性分析[D]. 湖南:
国防科学技术大学.
- 岳东宁,赵军,马燕云,等. 2017. 电感耦合等离子体离子源气体温度
特性数值模拟分析[J]. 质谱学报,38(5):521-525.
- 杜世刚. 1998. 等离子体物理[M]. 原子能出版社.
- 贾美清. 2009. 电感耦合等离子体质谱仪的保养与维护[J]. 分析试验
室,(S2):297-299.
- 杨岳衡,张宏福,吴福元,等. 2005. Neptune 多接收器等离子体质谱
精确测定锶同位素组成[J]. 质谱学报,26(4):215-221.
- 张庸,闫秀芬,杨丽,等. 2014. X Series II型电感耦合等离子体质谱
仪的故障解析[J]. 理化检验(化学分册),(7):903-905.
- 陈金发. 2021. NexION 350 电感耦合等离子体质谱仪的使用及故障
处理[J]. 冶金分析,41(1):92-97.
- 徐崇颖,王茜,杨嘉晖,等. 2019. 电感耦合等离子体质谱仪故障分析
与处理[J]. 冶金分析,39(3):49-53.
- 苑国强,赵晶晶,何秀娟. 2015. NexION 300X 型电感耦合等离子体
质谱仪的日常维护及故障排除[J]. 化学分析计量,(4):94-96.

References

- Finnigan Neptune Hardware Manual [M]. Thermo FisherScientific
Inc., 2003 Revision A.
- Spencer R L, Taylor N, Farnsworth P B. 2009. Comparison of
calculated and experimental flow velocities upstream from the
sampling cone of an inductively coupled plasma mass
spectrometer[J]. Spectrochimica Acta Part B Atomic
Spectroscopy, 64(9):921-924.
- HU Z C, LIU Y S, GAO S, et al. 2012. Improved in situ Hf isotope
ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone
and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen
by laser ablation multiple collector ICP-MS[J]. Journal of
Analytical Atomic Spectrometry, 27(9):1391-1399.
- Lindner H, Murtazin A, Groh S, et al. 2011. Simulation and
experimental studies on plasma temperature, flow velocity, and
injector diameter effects for an inductively coupled plasma. [J].
Analytical Chemistry, 83(24):9260-6.
- Houk R S, Fassel V A, Flesch G D, et al. 1980. Inductively coupled
argon plasma as an ion source for mass spectrometric
determination of trace elements[J]. Analytical Chemistry, 52(14):
2283-2289.
- Murphy A B, Arundelli C J. 1994. Transport coefficients of argon,
nitrogen, oxygen, argon-nitrogen, and argon-oxygen plasmas[J].
Plasma Chemistry & Plasma Processing, 14(4):451-490.