

气体流量与射频功率对 电感耦合等离子体温度分布的影响

金星, 段发鑫, 张晶晶, 张哲, 廖杨凡

(中国地质大学(武汉)自动化学院, 复杂系统先进控制与智能自动化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对以电感耦合等离子体(ICP)为激发光源的分析仪器, 研究 ICP 的温度空间分布对样品电离和激发具有重要意义。本研究建立了 ICP 的二维轴对称模型, 利用有限元方法解算磁流体动力学方程组, 得到 ICP 的最高温度和温度空间分布, 并研究了气体(辅助气、冷却气)流量和射频功率对 ICP 的最高温度和温度空间分布的影响。结果表明, 辅助气、冷却气的流量及射频功率几乎不会改变 ICP 的最高温度(约 10 000 K), 但会改变 ICP 的温度空间分布; 辅助气流量的增大有助于 ICP 中心通道的形成, 样品通过中心通道, 有利于样品的原子化和电离; 对于矩管直径为 20 mm 的 ICP, 未通入样品时, 运行时的射频功率在理论上不能超过 1 600 W, 而实际上空载功率可能更低。

关键词: 电感耦合等离子体(ICP); 温度; 有限元; 磁流体动力学; 激发光源

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2018)02-0192-09

doi: 10.7538/zpxb.2017.0069

Effect of Gas Volume Flow Rate and RF Power on the Temperature Distribution of Inductively Coupled Plasma

JIN Xing, DUAN Fa-xin, ZHANG Jing-jing, ZHANG Zhe, LIAO Yang-fan

(Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems,
School of Automation, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Mass spectrometer which takes inductively coupled plasma (ICP) as ion source has been widely used in the field of chemical elemental analysis. ICP has become the most popular ion source because of its high sensitivity, precision and repeatability. The process of ICP experiments showed that the temperature of ICP is difficult to measure directly, because the effect of gas flow rate and power of temperature distribution can not be obtained. The numerical simulation method and the finite element method were adopted to establish the two-dimensional axisymmetric magnetohydrodynamics model of ICP, which was used to study the temperature characteristics of plasma at different gas flow rates and RF power. Assuming that the ICP was in the state of local

收稿日期: 2017-04-10; 修回日期: 2017-08-29

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ09016701); 国家重点研发计划(2016YFF0100200)资助

作者简介: 金星(1961—), 男(汉族), 湖北武汉人, 教授, 从事光谱与成像仪器工程技术研究。E-mail: jinxing@cug.edu.cn

网络出版时间: 2018-02-11; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2979.TH.20180210.1319.010.html>

thermodynamic equilibrium(LTE), because the plasma could be considered as a kind of conductive fluid. The plasma satisfied the mass continuity equation, the momentum equation, the energy conservation equation and the Maxwell equation systems. And the hydrodynamic equation and the Maxwell equation were coupled by the Lorentz force. Ignoring its turbulence effect, the plasma was considered to be optically thin. And ignoring the energy dissipation and the pressure work in the energy equation, the flow of the plasma was considered to be laminar flow. The temperature spatial distribution of ICP under different conditions had been obtained by calculating the equation systems of magnetohydrodynamics. The results showed that the auxiliary gas, the cooling air flow rate and the RF power can hardly change the maximum temperature (about 10 000 K) of the ICP, but they can change the temperature spatial distribution of the ICP. The increase of auxiliary gas flow rate can help the formation of the ICP central channel to allow the sample to stay in the plasma for a longer period of time, which is conducive to the atomization and ionization of the sample and is extremely favorable for the sample analysis. Before entering samples, the plasma formed in the rectangle tube of 20 mm diameter, the RF power should not be greater than 1 600 W in theory, while the actual RF power may be lower.

Key words: inductively coupled plasma (ICP); temperature; finite element; hydromagnetics; excitation light source

电感耦合等离子体(inductively coupled plasma, ICP)^[1-3]是一种高能量的激发光源,它能提供一个高温且惰性的环境,使样品有效地蒸发、原子化、电离或激发。ICP的检出限低、灵敏度高、分析速度快、可同时检测多种元素,已广泛应用于冶金、化工、环境、农业等领域,是最重要的无机元素分析工具之一,是元素质谱、光谱分析中使用最普遍的一种离子源^[4-6]。

近年来,学者们对ICP的建模进行了广泛的研究。例如,Mostaghimi等^[7]研究了ICP中不同参数对流场和温度场的影响。随后,Mckelliget等^[8]建立了ICP的二维磁矢势模型,并研究线圈结构对ICP温度场的影响。Lindner等^[9-11]通过对电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)中所采用的电感耦合等离子体源进行二维建模,研究中心管直径、中心管出口到线圈的距离、辅助气和载气流速对ICP的影响,并分析不同条件下辅助气和载气流速的最佳取值,以及载气中混合不同比例的He对ICP中心通道的形成及温度的影响。Colombo等^[12-13]在二维磁矢势模型的基础上,利用流体模型建立了

三维模型,研究三路气体在ICP中的流动模式、流场和温度,同时表明ICP中的最高温度约为10 000 K^[12-13]。Punjabi等^[14]研究了不同线圈参数对ICP的温度场、功耗分布、壁面温度的影响。岳东宁等^[15]使用DPM(discrete phase model)模型分析了ICP-MS中不同直径气溶胶颗粒对中心通道气体温度的影响,发现颗粒直径太大会影响中心通道气体温度的稳定性。

在ICP实验研究过程中,发现很难直接测出ICP的温度,也就无法获取气体流量和功率对ICP温度分布的影响。ICP的温度分布决定了样品能否获得有效地蒸发、原子化、激发及电离。因此,通过仿真研究ICP的温度分布,并进一步探讨气体流量和功率对ICP温度分布的影响是非常必要的。

本工作拟采用自制的ICP源作为研究的几何模型,采用有限元分析软件COMSOL5.1建立ICP的二维轴对称磁流体力学模型。通过对ICP磁流体力学方程组的计算,获得ICP的温度空间分布特征,并在此基础上,研究不同气体流量和功率与ICP最高温度的关系,以及在不同气体流量和功率下ICP温度场的变化。

1 磁流体力学模型

1.1 几何模型

假设 ICP 炬焰是完全轴对称的,则可以把其简化为 1 个二维轴对称模型,示于图 1。其中, Q1 为载气, Q2 为辅助气, Q3 为冷却气, 3 路气体均为纯度 100% 的 Ar, 计算域的横向长度为 50 mm, 高度为 45 mm, ICP 模型的详细尺寸列于表 1。射频源的激发频率是 27.12 MHz, 将感应线圈简化为与 ICP 同轴的 3 个实心铜圆环, 射频源以适当功率与感应线圈能量耦合, 产生的热量使气体离子化, 从而形成火炬状等离子体。

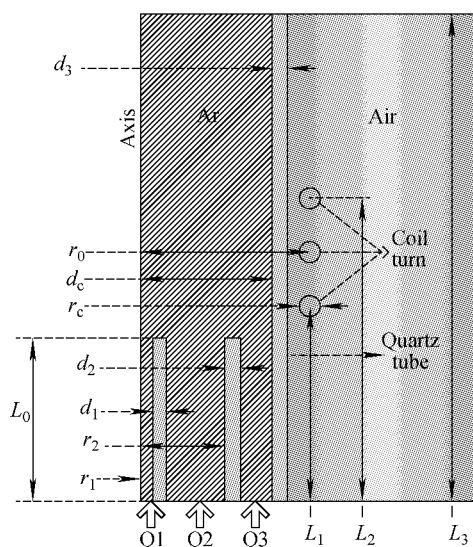


图 1 ICP 二维轴对称模型图

Fig. 1 2D axisymmetric model of ICP

表 1 ICP 模型尺寸表

Table 1 Model dimension of ICP

参数 Parameters	尺寸 Dimensions/mm	参数 Parameters	尺寸 Dimensions/mm
r_0	13	d_2	1.2
r_1	0.6	d_3	1.2
r_2	6	L_0	20
r_c	9	L_1	25
d_c	9	L_2	39
d_1	1	L_3	60

1.2 流体力学方程

质谱分析所采用的 TCP 属于热等离子体,

其粒子密度大, 电子与粒子间碰撞频繁, 整个系统处于局部热力学平衡状态 (LTE)。在 LTE 中, 热等离子体可以被认为是一种导电液体^[16]。根据流体力学所揭示的一般规律, 一切流动现象均满足最基本的质量连续方程和动量方程, 同时, 因为存在传热过程, 也必定满足能量守恒。流体力学方程认为, 等离子体属于光学薄的, 同时忽略等离子体的湍流效应; 还认为等离子体的流动为层流流动, 忽略能量方程中粘性耗散和压力功。

在磁流体模型下, 等离子体服从流体的质量连续方程和动量方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \nabla \cdot \mathbf{P} + \mathbf{F} \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度, $\mathbf{u}$ 为流体速度, $\mathbf{F}$ 为洛伦兹力, $\mathbf{P}$ 为应力张量。

对于 ICP 流体模型, 忽略流体压缩效应, 应力张量可表示为:

$$\mathbf{P} = 2\eta \mathbf{S} - \left(p + \frac{2}{3} \eta \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \mathbf{I} \quad (3)$$

式中, η 为粘滞系数, $\mathbf{I}$ 为单位张量, p 为压强, $\mathbf{S}$ 为变形速度张量。其中, $\mathbf{S}$ 可表示为:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (4)$$

由流体运动欧拉法可知:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \quad (5)$$

将式(3)代入式(2), 并根据式(4)和式(5), 可得:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \eta (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \eta (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}) + \mathbf{F} \quad (6)$$

在定常流动下, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, 且 $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = 0$, 则 ICP 动量方程和连续方程可表示为:

$$\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \eta (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \eta (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}) + \mathbf{F} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

其中, 洛伦兹力可表示为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别为电流和磁场。电流 $\mathbf{J}$ 可表

示为:

$$J = \sigma(E + u \times B) \quad (10)$$

式(10)又称为广义欧姆定律,其中 σ 是电导率, E 是电场, B 是磁场。等离子体中的电磁场方程可由麦克斯韦方程确定^[17]。

根据热力学第一定律,可以得到能量守恒方程:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla) T \right) + \nabla \cdot q = Q - Q_R \quad (11)$$

式中, C_p 为比热容, T 为绝对温度, Q 为单位体积内产生的总能量, Q_R 为辐射能量, q 为热流矢量,等号左边第1项表示积聚的热量,第2项表示热传导热量。

根据傅里叶导热定律, q 与温度梯度成正比,即:

$$q = -k \nabla T \quad (12)$$

其中 k 为热导率。

工作气体的速度 u 可表示为:

$$u = -U_0 n \quad (13)$$

式中, n 表示速度为法向流入, U_0 为速率。

气体速率与气体流量的关系示于式(14):

$$U_0 = \frac{MQ_q}{\rho_b M_b A} \quad (14)$$

式中, M 为Ar的摩尔质量, Q_q 为气体流量, ρ_b 和 M_b 分别为标况下Ar的密度和气体的摩尔体积, A 为气体横截面积。

将式(7)、(8)、(11)和文献[17]中的电磁场方程共同组成等离子体的磁流体力学方程组,配合等离子体的边界条件,可以算出ICP的温度。

文献[17]中的电磁场方程组如下:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (15)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (16)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (17)$$

$$B = \nabla \times A \quad (18)$$

其中, μ_0 为自由空间的磁导率, A 为磁矢势。

1.3 计算区域及边界条件

以实验室研制的ICP作为参照,建立ICP的几何模型,并进行网格划分,示于图2a。其中,颜色较深的部分表示等离子体区域和矩管区域,此区域为等离子体的主要计算区域,即流体区域,因此网格划分特别细化;浅色区域为空气区域和线圈区域,所有网格都划分为三角形,

且较为稀疏。为使仿真更加精确,中心管、中层管壁面、外管内壁的网格划分均使用边界层。中心管边界网格分层示于图2b,考虑线圈内层高频电流下的趋肤效应,同样划分为边界层类型^[18],然后设定边界层数和厚度来控制网格,最后共得到26 527个网格。

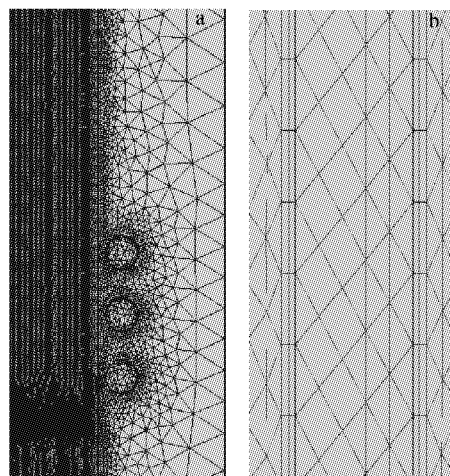


图2 ICP的网格图(a)和边界网格分层设定图(b)

Fig. 2 Schematic of grid (a) and boundary grid hierarchical (b) of ICP

几何模型的矩管入口边界条件设置为速度边界条件,速度与流量的换算关系示于式(13),载气 Q_1 和辅助气 Q_2 的流量范围为0~2 L/min,冷却气 Q_3 的流量范围为10~20 L/min。矩管出口边界条件设置为相对压力0,矩管壁边界条件设置为无滑移,矩管与空气温度设置为300 K。

2 结果与讨论

2.1 ICP温度空间分布

元素分析时,等离子体的温度是关键参数,其温度分布决定了元素能否被完全激发和电离。ICP在实验室工作参数下(射频功率 $P=1$ kW, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 的流速分别为1、2、15 L/min)的温度空间分布截面图示于图3。为了便于观察,本工作所有的温度空间分布图都是由ICP二维轴对称模型的结果绕对称轴旋转180°得到。在图3中,线圈附近的温度高于矩管中心的温度,其最高温度为10 095 K,偏离轴心位置,出现在线圈附近,所以矩焰中心温度略低

于外环温度,这是由趋肤效应导致的。电流密度在等离子体内分布不均,线圈附近的电流密度比矩管中心大,因此线圈附近产生的热量大于矩管中心,炬焰外部环形层流传热和热传导是炬焰中心低温区升温的主要原因。趋肤效应所形成的等离子体高温区域呈环形,因此,在等离子体中心形成了1个中心进样通道。载气携带试样通过等离子体中心通道,不会逸散到等离子体外,在等离子体中有较长的停留时间;试样长时间被等离子体高温区域包围,有利于试样的原子化和电离,对样品分析极为有利^[19]。

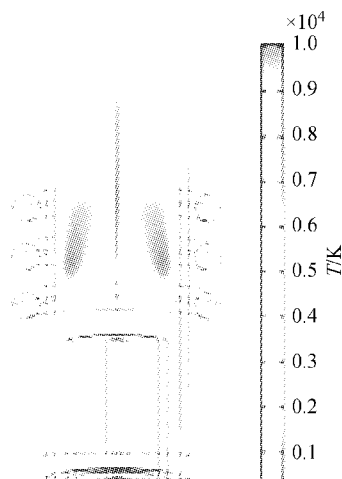


图3 ICP温度空间分布截面图
Fig. 3 Temperature spatial distribution of ICP

2.2 辅助气体流量对 ICP 温度的影响

辅助气是通入中心管与中层管之间的气体,在点火初期“点燃”等离子体,并使高温的等离子体底部与中心管、中层管保持一定的距离,保护中心管和中层管的顶端,尤其是中心管口不被烧熔或过热,减少气溶胶所携带的盐分沉积在中心管口上。辅助气流量一般为0~2 L/min。设置 $P=1$ kW, Q_1 、 Q_3 的流量分别为1、15 L/min,测试不同辅助气体流量对 ICP 温度的影响。

不同辅助气体流量下的等离子体最高温度变化示于图4。在不同载气流量下,ICP的最高温度随辅助气体流量的增大近似呈线性增

长,但最大变化量不超过50 K,因此,可认为辅助气体流量不影响 ICP 的最高温度,这与文献^[20]中关于金属粉末颗粒球化实验采用的 ICP 所述结论一致。

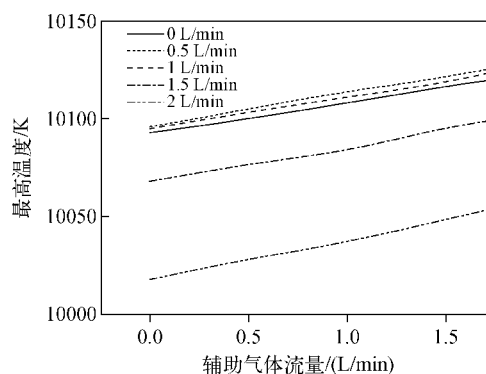


图4 ICP不同载气流量下,最高温度与辅助气体流量的关系

Fig. 4 Variation curves of ICP maximum temperature with auxiliary gas volume flow rate at different carrier gas volume flow rate

不同辅助气体流量下,ICP的等值温度线示于图5,每个ICP温度等值线图都有2个轴对称且被颜色最深的温度等值线(9800 K)包围的区域,此区域为ICP的高温区,高温区域随着辅助气体流量的增大没有发生变化。辅助气体流量由0 L/min增大到2 L/min时,温度为9300 K的等温线所包围的区域被分成2个小区域,并且总面积变小,而且形成1个两边温度高、中间温度低的中心通道。所以,辅助气体流量的增大有助于等离子体中心通道的形成。

2.3 冷却气体流量对 ICP 温度的影响

冷却气也称为等离子气,冷却气沿矩管切线方向进入矩管外管,是形成等离子体过程中流量最大的一路气体,占总气体流量的80%~90%,是放电气体的主要来源。它的主要作用是冷却矩管,保护石英矩管免受高温熔化,使等离子体的内表面冷却,并与管壁保持一定的距离。其流量通常为10~20 L/min。设置 $P=1$ kW, Q_1 、 Q_2 的流量分别为1、2 L/min,测试不同冷却气体流量下 ICP 的最高温度和等温曲线。

不同冷却气体流量下,ICP的最高温度曲线图示于图6。ICP的最高温度随冷却气体流

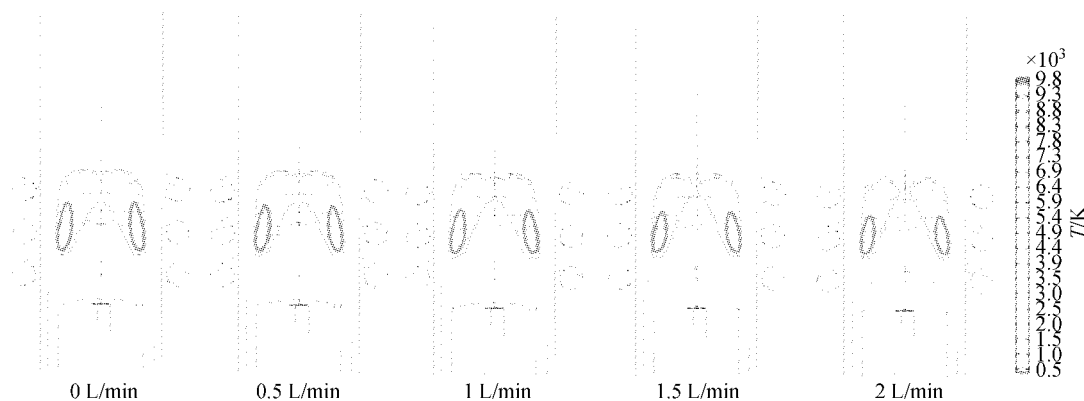


图5 不同辅助气体流量下,ICP 的温度等值线图

Fig. 5 Isotherm of ICP at different auxiliary gas volume flow rate

量的增加近似呈线性增大,但冷却气流量从 10 L/min 增大到 20 L/min 时,ICP 的最高温度从 9 982 K 增加到 10 203 K,仅变化了 221 K。因此,可认为冷却气流量对 ICP 最高温度几乎没有影响。

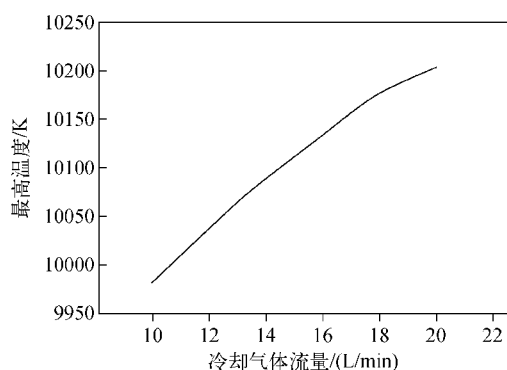


图6 不同冷却气体流量下,ICP 的最高温度曲线图

Fig. 6 Variation curve of ICP maximum temperature with cooling gas volume flow rate

不同冷却气体流量下的等温曲线图示于图 7。可知,等温曲线 9 800、9 300 K 包围的区域面积随着冷却气体流量的增大而减小,其他等温曲线区域则逐渐往轴向方向凸起。实验还发现,冷却气体流量越大,ICP 炬焰越长,这是由于冷却气体流量增大会带走 ICP 更多的能量,从而改变 ICP 的温度空间分布。因此,可以通过调节冷却气体流量控制矩管壁的温度,以保护矩管,文献[18]也绘制了矩管壁处的温度随冷却气体流量的变化曲线。冷却气体流量选择不当,会导致载气在等离子体中做旋转运动,不利于样品分析,因此,商用质谱仪一般不允许改变冷却气体流量。对于直径 20 mm 的矩管,一般设置冷却气体流量在 14~16 L/min 之间。本研究选择的冷却气体流量为 15 L/min^[19]。

2.4 射频功率对 ICP 温度的影响

射频电源通过电磁感应的方式将能量不断

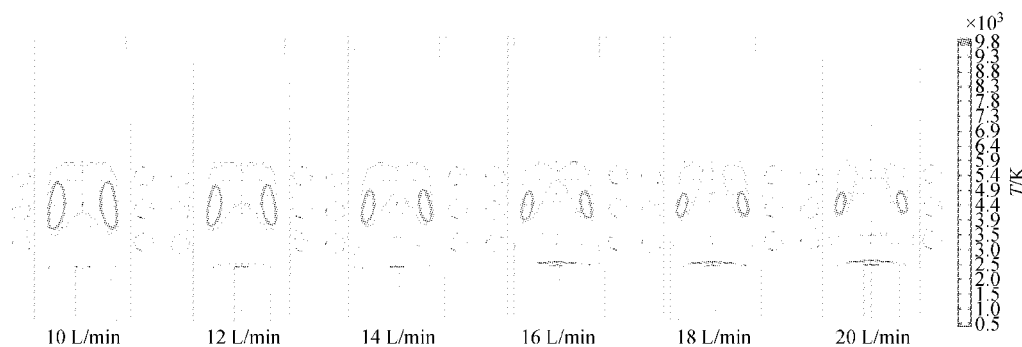


图7 不同冷却气流量下的等温曲线

Fig. 7 Isotherm of ICP at different cooling gas volume flow rate

地传输给矩管内的 Ar 而形成稳定的等离子。分析水溶液时,通常将射频功率设置为 1 kW;如果样品浓度大或者分析有机物时,一般需要增大射频功率。设置 Q1、Q2、Q3 的流量分别为 1、2、15 L/min,研究射频功率的变化对 ICP 温度的影响。

射频功率和 ICP 最高温度、矩管壁最高温度的关系示于图 8。可见,ICP 最高温度与射频功率近似呈线性正相关;ICP 射频功率从 700 W 上升至 2 000 W 时,最高温度从 9 853 K 增加到 10 514 K,仅增加了 661 K,功率每增加 100 W,最高温度仅增长 51 K。因此可认为射频功率几乎不能改变 ICP 的最高温度。

不同射频功率下的 ICP 温度空间分布图示于图 9。随着射频功率的增加,ICP 的高温(9 500 K 与 10 000 K)等温线包围区域面积增大,同时高温区域更加靠近矩管壁。在实验中发现,等离子体的发光强度随输入功率的增大而增大。由此说明,增大射频功率会导致矩管温度上升,而温度过高会导致矩管软化。图 8 的矩管壁温度曲线也证明了这一点,在 1 600 W

时,矩管温度可达 1 300 K,已接近矩管的软化温度(约 1 400 K^[21])。实验中,为了让样品更快地进入等离子体,常把中心管口与线圈的第 1 圈平衡放置,使矩管承受的温度更高,因此,在未通入样品时,不允许 ICP 大功率运行。常将初始功率设为 1 kW,如果还需增加功率,则要先通入一部分样品或者水,再调节射频功率。

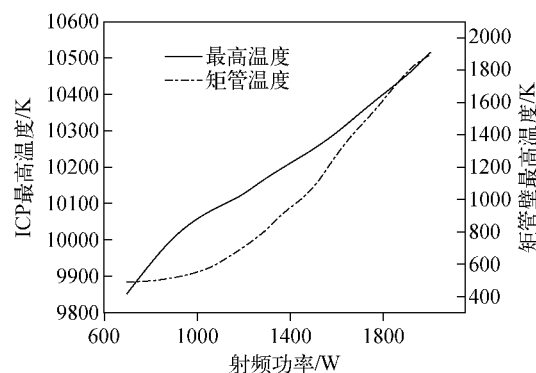


图 8 射频功率与 ICP 最高温度及矩管壁最高温度的关系图

Fig. 8 Variation curves of ICP maximum temperature and wall maximum temperature with RF power

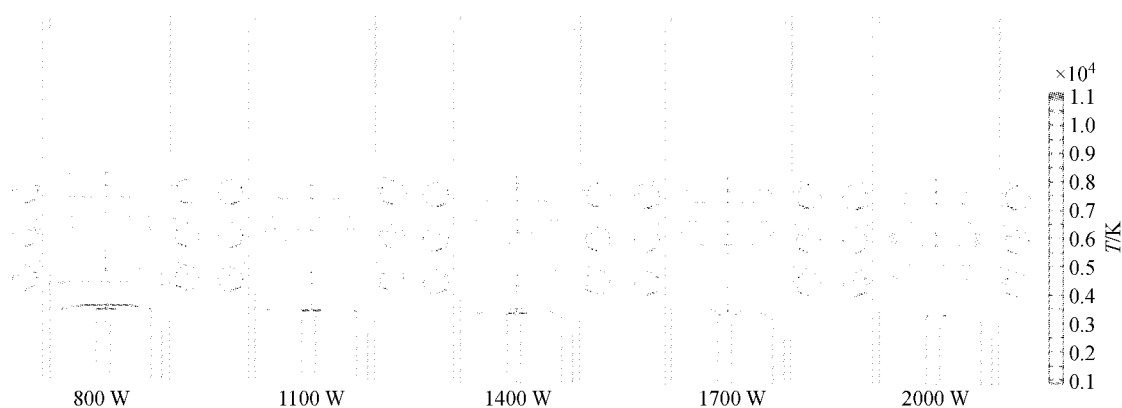


图 9 不同射频功率下的 ICP 温度等值线图

Fig. 9 Isotherm of ICP at different RF power

3 结论

本工作建立了质谱、光谱分析常用的电感耦合等离子源的二维磁流体力学模型,分析了辅助气体与冷却气体流量、射频功率对 ICP 的最高温度及温度空间分布的影响。结果表明,ICP 的最高温度为 10 000 K 左右,且位置偏离轴心,出现在线圈附近,这是由趋肤效应导致的。辅助气体、冷却气体流量及射频功率几乎

不会改变 ICP 的最高温度,但会改变 ICP 的温度空间分布。辅助气体流量的增大有助于 ICP 中心通道的形成,使样品更长时间地被等离子体高温区域包围,有利于样品的原子化和电离。ICP 高温区域的面积随射频功率的增大而增大,在实验中表现为等离子体亮度增大、矩管壁温度升高。因此,为了仪器安全,在未通入样品前,不允许 ICP 大功率运行,理论上不能超过

1 600 W,因中心管口与线圈的第1圈常被平衡放置,所以空载功率可能更低。

参考文献:

- [1] CUNGE G, CROWLEY B, VENDER D, et al. Anomalous skin effect and collisionless power dissipation in inductively coupled discharges[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(89): 3 580-3 589.
- [2] AGHAEI M, BOGAERTS A. Particle transport through an inductively coupled plasma torch: elemental droplet evaporation[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2016, 31(3): 631-641.
- [3] SUBRAMONIUM P, KUSHNER M J. Pulsed plasmas as a method to improve uniformity during materials processing[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(1): 82-93.
- [4] 袁本高,张东阳,李龙,等. ICP-MS法测定添食金属纳米颗粒后家蚕组织中的金属含量[J]. *质谱学报*, 2016, 38(2): 256-264.
YUAN Bengao, ZHANG Dongyang, LI Long, et al. Determination of metal contents in the tissues of silkworm after fed with nanoparticles using inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2016, 38(2): 256-264(in Chinese).
- [5] QUIGLEY K M, ALTHOFF A G, DONATI G L. Inductively coupled plasma optical emission spectrometry as a reference method for silicon estimation by near infrared spectroscopy and potential application to global-scale studies of plant chemistry[J]. *Microchemical Journal*, 2016, (129): 231-235.
- [6] 胡晓楠,李力力,陈彦,等. IC-MC-ICP-MS测量环境水样品中钚同位素比值的方法研究[J]. *质谱学报*, 2016, 37(2): 173-179.
HU Xiaonan, LI Lili, CHEN Yan, et al. Determination of Pu isotope ratio in environmental water samples by IC-MC-ICP-MS[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2016, 37(2): 173-179(in Chinese).
- [7] MOSTAGHIMI J, PROULX P, BOULOS M I. Parametric study of the flow and temperature fields in an inductively coupled r. f. plasma torch[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1984, 4(3): 199-217.
- [8] MCKELLIGET J W, ELKADDAH N. Theoretical prediction of the effect of coil configuration on gas mixing in an inductively coupled plasma torch[M]. *Mrs Proceedings*, 1987: 98.
- [9] LINDNER H, BOGAERTS A. Multi-element model for the simulation of inductively coupled plasmas: effects of helium addition to the central gas stream[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2011, 66(6): 421-431.
- [10] AGHAEI M, LINDNER H, BOGAERTS A. Optimization of operating parameters for inductively coupled plasma mass spectrometry: a computational study[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2012, 76(10): 56-64.
- [11] AGHAEI M, LINDNER H, BOGAERTS A. The effect of the sampling cone position and diameter on the gas flow dynamics in an ICP[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2013, 28(9): 1 485-1 492.
- [12] COLOMBO V, GHEDINI E. 3-D modeling of ICP torches[J]. *High Temperature Material Processes*, 2007, 11(2): 283-296.
- [13] COLOMBO V, GHEDINI E, MOSTAGHIMI J. Three-dimensional modeling of an inductively coupled plasma torch for spectroscopic analysis[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(4): 1 040-1 041.
- [14] PUNJABI S B, DAS T K, JOSHI N K, et al. The effect of various coil parameters on ICP torch simulation[C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 208(1): 012048.
- [15] 岳东宁,赵军,马燕云,等. 电感耦合等离子体质谱离子源气体温度特性数值模拟分析[J]. *质谱学报*, 2017, 38(5): 521-525.
YUE Dongning, ZHAO Jun, MA Yanyun, et al. Numerical analysis of gas temperature in inductively coupled plasma ion source[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2017, 38(5): 521-525(in Chinese).
- [16] BOGAERTS A, BLEECKER K D, GEORGIEVA V, et al. Numerical modeling for a better understanding of gas discharge plasmas[J]. *High Temperature Material Processes*, 2005, 9(3): 321-344.
- [17] BERNARDI D, COLOMBO V, GHEDINI E, et al. Comparison of different techniques for the FLUENT-based treatment of the electromagnetic

- field in inductively coupled plasma torches[J]. The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics, 2003, 27(1): 55-72.
- [18] LEE H C, OH S J, CHUNG C W. Experimental observation of the skin effect on plasma uniformity in inductively coupled plasmas with a radio frequency bias[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2012, 21(3): 035003.
- [19] AGHAEI M, FLAMIGNI L, LINDNER H, et al. Occurrence of gas flow rotational motion inside the ICP torch: a computational and experimental study[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2014, 29(2): 249-261.
- [20] 朱海龙,童洪辉,杨发展,等. 数值模拟感应耦合氩气热 ICP 温度和速度的空间分布[J]. 高电压技术, 2013, 39(7): 1 621-1 627.
- ZHU Hailong, TONG Honghui, YANG Fazhan, et al. Numerical simulation of the temperature and velocity's spatial distributions of inductively coupled argon thermal plasma[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(7): 1 621-1 627 (in Chinese).
- [21] VORONOV M, HOFFMANN V, ENGELHARD C, et al. Computational model of inductively coupled plasma sources in comparison to experimental data for different torch designs and plasma conditions. Part I: experimental study[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2017, 32(1): 167-180.