

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.04.019

# Ar-MIP 在石英管内传热与流动特征研究

高鑫鑫<sup>1</sup>, 华伟<sup>1</sup>, 张弘<sup>1</sup>, 常颖<sup>2</sup>

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610065; 2. 沈阳大学师范学院, 沈阳 110044)

**摘要:** 本文利用有限元方法建立了大气压下微波氩等离子体(Ar-MIP)三维模型,数值仿真了氩等离子体在不同时刻的温度、压强、速度等参数的空间分布情况,分析了这些参数的相互影响,探究微波等离子体流动瞬态特征. 研究表明: 等离子体气体温度随着时间增加而增加,其高温分布呈现空间不均匀,导致气压的局部变化,影响了流体的流速和流向,形成热流绕热现象,这是导致炬管内高温区域流体速度减缓的主要原因.

**关键词:** 微波氩等离子体; 电子密度; 压强; 流速

**中图分类号:** O531      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2019)04-0703-06

## Study on heat transfer and flow characteristics of Ar-MIP

GAO Xin-Xin<sup>1</sup>, HUA Wei<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>1</sup>, CHANG Ying<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. Normal College, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

**Abstract:** A 3-D model of microwave argon plasma (Ar-MIP) under atmospheric pressure is established with the finite element method to describe the temporal and spatial distribution of plasma temperature, pressure, and velocity. The interaction of these parameters is studied to explore the mechanism of microwave plasma excitation. The results show that the plasma temperature increases upon increasing the time, and the high temperature distribution exhibits spatial inhomogeneity, which causes the local changes in gas pressure and affects the flow velocity leading the thermal flow around the heat area. This is the reason that the fluid in high temperature region slows down.

**Keywords:** Microwave argon plasma; Electron density; Pressure; Flow rate

### 1 引言

微波诱导等离子体(Microwave induced plasma, MIP)是通过谐振腔中驻波的能量诱导而产生,并在插入谐振腔体中的石英管或陶瓷管中维持的无电极系统等离子体<sup>[1]</sup>. 基于微波诱导等离子体的技术,于 20 世纪 50 年代已受到关注,目前广泛应用于工业、基础科学研究、食品安全、污染治理、材料处理、航空航天等多个领域<sup>[2-4]</sup>.

在具有离子反应、多个物理场影响的复杂条件下,等离子体异于普通流体,其流动过程和热传导过程相互影响,涉及到能量形式转变的热力学过程<sup>[5]</sup>. 将等离子体的流动、传热和能量转换作为整体行为研究,因其伴随着热现象而被称为“热流体”. 曹修全等人通过实验研究了层流等离子体发生器对电弧的电压特性和热效率的影响<sup>[6]</sup>. 由于实验手段难以捕捉等离子体激发过程瞬态特征,数值模拟方法则成为研究等离子体激发过程瞬态特

收稿日期: 2018-12-06  
基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2017YFB0308601); 国家自然科学基金民航联合基金(U1733109)  
作者简介: 高鑫鑫(1993—), 男, 硕士, 研究方向为电磁场与微波技术、微波等离子体.  
通讯作者: 华伟. E-mail: hua23557@163.com

征的重要手段. Peng 等融合了非正交边界协调网格、非交错变量排列和全速 SIMPLE 算法,给出了炬管内 DC 等离子体的流动和传热的二维数值仿真结果<sup>[7]</sup>;金英俊和罗康等借助格子-Boltzmann 法构建二维轴对称仿真模型,得到了能量分布和气体温度等参数,展示了等离子体传热和流动过程<sup>[8]</sup>;Gadonna 等人建立了大气压下微波氦等离子体二维模型,通过补充添加离子阻力和焦耳加热参数,研究了电子束中等离子体气体运输和加热机制<sup>[9]</sup>. Yang 等建立了大气压微波等离子体三维的模型,给出了微波等离子体产生过程中的瞬态特征,包括电子密度、电子能量电场分布<sup>[10]</sup>,然而,关于等离子体的流动的瞬态空间参数变化的研究尚待加强. 本文基于流体模型建立了大气压氩微波等离子体三维模型,用以研究氩气激发过程中,气体温度、压强、流速等参数的变化情况.

2 建模

微波等离子体发生装置一般由微波功率源、隔离器、环形器、阻抗匹配器、谐振腔和负载等组成. 微波经过隔离器后到达压缩波导处,经过压缩波导时电磁波的场强进一步加强. 在距离短路板四分之一波长处开有圆孔,插入石英管,形成放电区域,管内通入工作气体,电离激发产生等离子体,最后产生反射的功率由环形器到达负载. 在数值模型

中则需要设置相应物理场中的边界,从而简化微波等离子体炬的发生装置. 图 1 为本文建立微波等离子体装置的模型示意图. 由压缩波导和石英管构成三维模型如图 1(a)所示,忽略了微波装置的其他部分,例如,将忽略石英管外的冷却机制,将管外金属装置由 PEC 代替,设置初始温度,从而简化气体加热装置. 图 1(b)表示模型各部分的尺寸.

有关模型电磁场、等离子体场、温度场及边界条件的建模细节可参考文献<sup>[10,11]</sup>. 本文主要关注气体放电对管内气压变化与流体运动的影响,在石英管中的气体流动描述的 Navier-Stokes 方程:

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

(1)

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}]$$

(2)

其中,  $p$  和  $\rho$  分别是压强和气体密度,  $\mathbf{u}$  和  $\mathbf{I}$  分别是速度和单位张量,  $\mu$  表示流体的动态粘度.

气体电离在短时间内产生大量热,因此给出传热方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\sigma_k \nabla T) + Q$$

(3)

其中,  $C_p$  表示比热容,  $\sigma_k$  表示导热系数,  $Q$  表示热源.

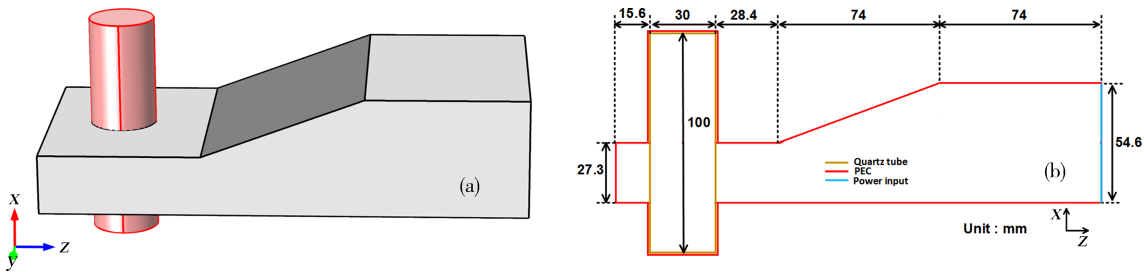


图 1 大气压微波等离子体模型图: (a) 三维模型图; (b) 二维模型尺寸图  
Fig. 1 Model diagram of microwave plasma under atmospheric pressure: (a) 3-D model diagram; (b) the size of 2-D model

氩气激发放电过程中需要考虑粒子间复杂的碰撞过程、反应过程以及能量转化过程. 表 1 给出了氩气在反应过程中涉及的主要反应过程与碰撞过程. 电子能量服从 Maxwellian 分布,所涉及反应过程的反应系数可表示为:

$$k_k = \gamma \int_0^\infty \epsilon \sigma_k(\epsilon) f(\epsilon) d\epsilon$$

(4)

其中,  $\gamma = \sqrt{2q/m_e}$ ,  $\epsilon$  和  $\sigma_k(\epsilon)$  分别是电子能量和服

从能量分布的碰撞截面数据,  $q$  表示电子电荷量和电子质量. 表 1 中的反应 7、8 可由范霍夫规则计算获得,即当温度每升高 10 K,反应速率即增加 2 到 4 倍. 工作气体为氩气,气体的初始温度为 473. 15 K,采用轴向进气方式,即从石英管底端沿  $x$  轴向上供气,流量为 40 slpm,初始气压为 1 atm. 微波的输入功率为 500 W,工作频率为 2. 45 GHz. 初始电子密度设置为  $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ .

表 1 氩气放电过程中涉及到的主要化学反应和碰撞过程  
Tab. 1 Chemical reactions and collision processes involved in argon discharge

No.	Type	Reaction	$\Delta E(\text{eV})$
1	Elastic	$\text{Ar} + \text{e} \rightarrow \text{Ar} + \text{e}$	0
2	Ground state excitation	$\text{Ar} + \text{e} \rightarrow \text{Ar}^* + \text{e}$	11.56
3	Ground state ionization	$\text{Ar} + \text{e} \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\text{e}$	15.8
4	Step-wise ionization	$\text{Ar}^* + \text{e} \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\text{e}$	4.24
5	Superelastic collision	$\text{Ar}^* + \text{e} \rightarrow \text{Ar} + \text{e}$	-11.56
6	Diffusion	$m \rightarrow \text{wall}$ $m = (\text{Ar}^*, \text{e}, \text{Ar}^+)$	...
7	Metastable pooling	$\text{Ar}^* + \text{Ar}^* \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{e}$	...
8	Two-body quenching	$\text{Ar} + \text{Ar} \rightarrow 2\text{Ar}$	...

3 结果与分析

仿真得到如图 2 所示的石英管内气体温度在  $0 \sim 10^{-1} \text{ s}$  内的空间分布。在  $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}$  内, 气体温度随着时间缓慢上升, 高温区域集中在 GF 区

域; 由于流体热传导时间影响, 在  $10^{-4} \text{ s}$  之后, 气体温度急剧升高;  $10^{-2} \text{ s}$  时受向上层流的影响, 靠近 HF 管壁附近气体的温度沿轴向先增加, 然后气体温度又有所下降, 等离子体高温区域沿轴向往上移动, 这使得石英管内温度最大值位置位于 GF 区域上方。在  $10^{-1} \text{ s}$  气体温度最大值达到  $2170.5 \text{ K}$ 。此时, 石英管内热量往石英管 HF 管壁转移, 高温区域主要集中在石英管的 HF 区域。这是因为流体流动像内热源或热汇一样改变了流体内部的温度场分布, 使壁面处温度梯度增大, 从而提高了热量交换。局部的温升效应使得壁面处的速度梯度增大, 边界层中的“热源”项也必然增大。流体的流动起着内热源的作用, 改变了原来的温度分布, 导致壁面处温度梯度提高。壁面附近处的速度梯度愈大则对流换热强度(即壁面处的流体向固壁的导热强度)愈大。所以,  $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ s}$  气体的热往石英管 HG 壁面转移。

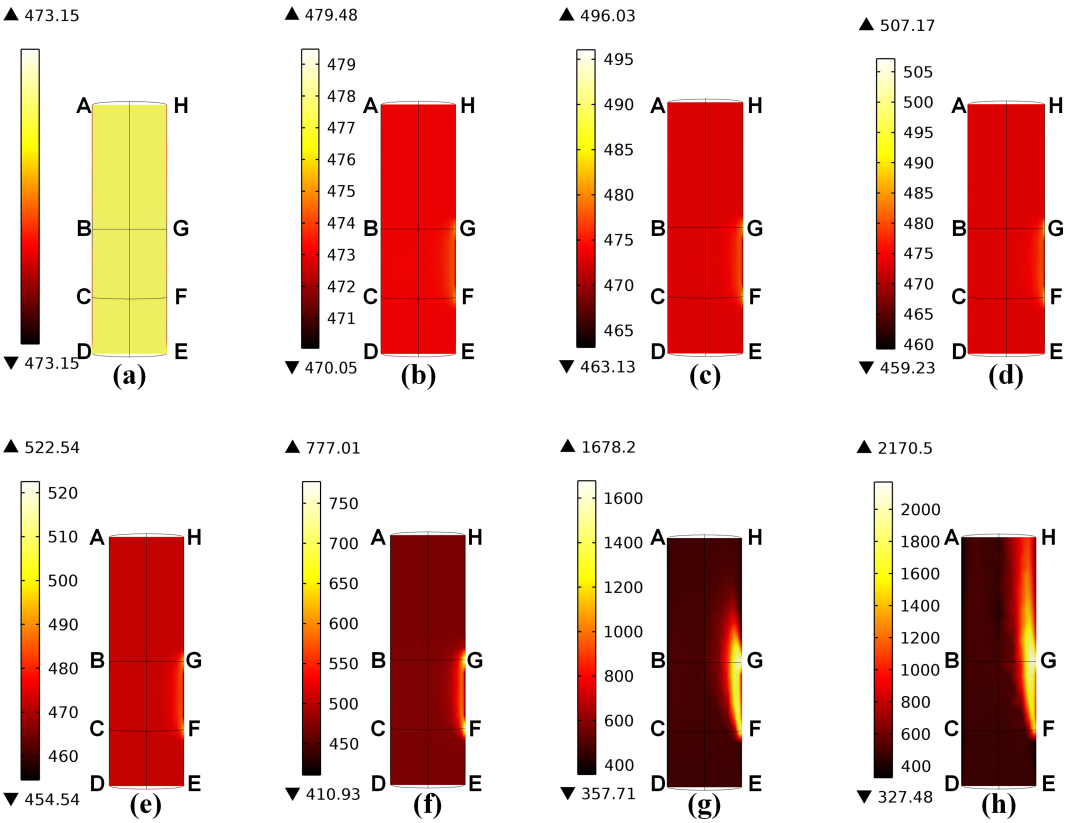


图 2 不同时刻  $z-x$  平面的气体温度图: (a)  $10^{-8} \text{ s}$ ; (b)  $10^{-5} \text{ s}$ ; (c)  $3.98 \times 10^{-5} \text{ s}$ ; (d)  $6.31 \times 10^{-5} \text{ s}$ ; (e)  $10^{-4} \text{ s}$ ; (f)  $10^{-3} \text{ s}$ ; (g)  $10^{-2} \text{ s}$ ; (h)  $10^{-1} \text{ s}$   
Fig. 2 2-D distribution of gas temperature with  $z-x$  section at different time: (a)  $10^{-8} \text{ s}$ ; (b)  $10^{-5} \text{ s}$ ; (c)  $3.98 \times 10^{-5} \text{ s}$ ; (d)  $6.31 \times 10^{-5} \text{ s}$ ; (e)  $10^{-4} \text{ s}$ ; (f)  $10^{-3} \text{ s}$ ; (g)  $10^{-2} \text{ s}$ ; (h)  $10^{-1} \text{ s}$

在放电过程中石英管内的气压发生了明显的变化, 图 3 展示了石英管内不同时刻  $z-x$  平面的压强云图。在  $10^{-8} \text{ s}$  时石英管进气口(DE)的气压低

于出气口(AH)处的气压, 压差约为  $10 \text{ Pa}$ 。随着气体放电的发生, 产生了紧缩现象, 电子集中分布在石英管和波导重叠部分(BCFG 区域)的右侧(GF

区域)<sup>[11]</sup>,在石英管的 GF 区域粒子之间能量交换频繁,气压在  $10^{-5}$  s 的 GF 区域逐渐变大,其高压区域逐渐扩大. 随着电子的扩散,高能电子向石英管 BC 侧迁移,与石英管 BC 侧的重粒子进行能量交换. 因此,在  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  s 时间内等离子体的

高压区域从石英管的 GF 侧向 BC 侧移动,在  $10^{-4}$  s 时刻,压强峰值位于石英管内 BC 区域. 在  $10^{-3}$  s 后管内压强逐渐趋于稳定,气压差为 10 Pa. 在  $10^{-1}$  s 时刻,管内压强在整个管内差异较小,石英管出气口处(AH)压强低于进气口(DE)压力.

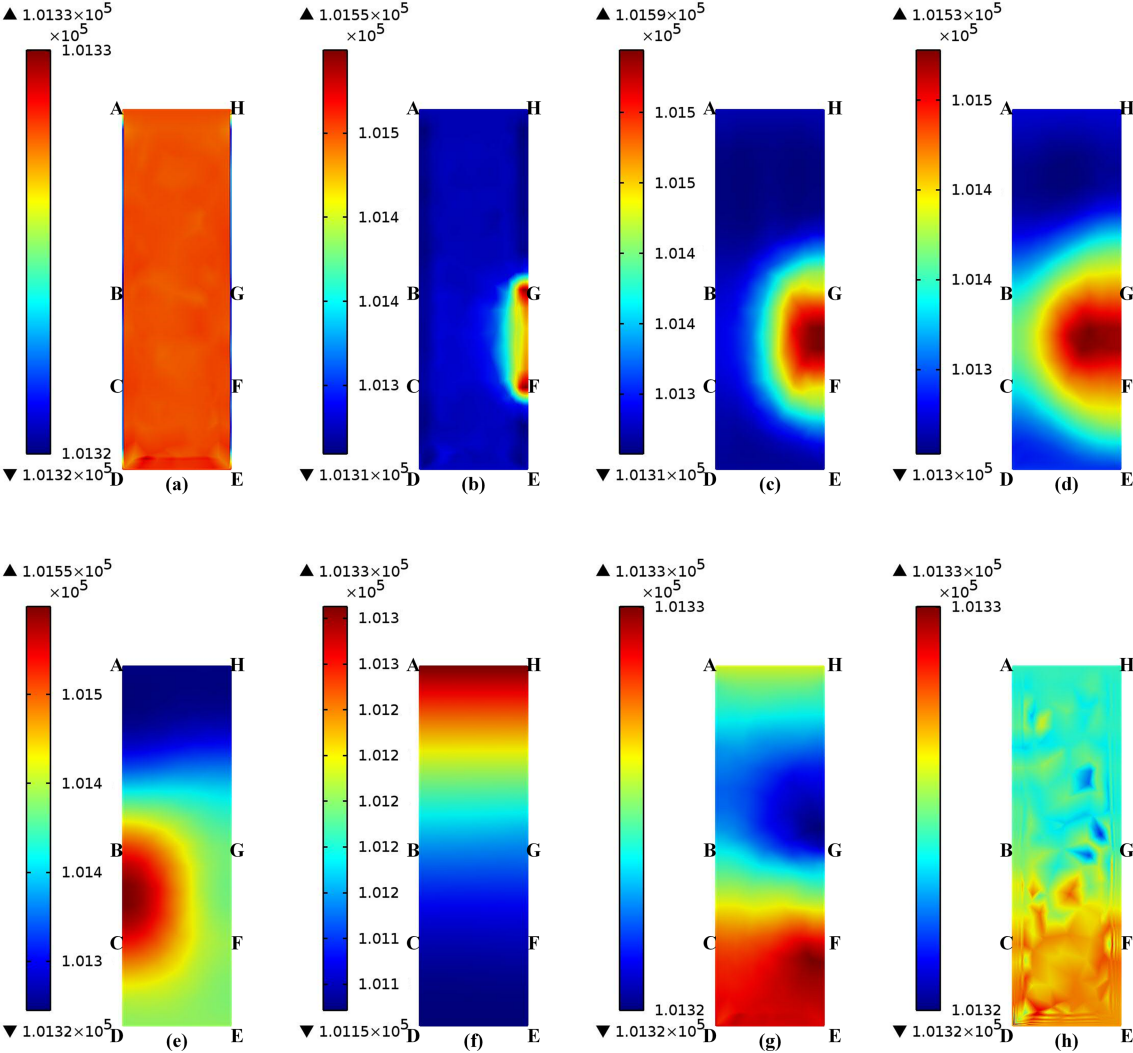


图 3 不同时刻  $zx$  平面的压强云图:(a)  $10^{-8}$  s; (b)  $10^{-5}$  s; (c)  $3.98 \times 10^{-5}$  s; (d)  $6.31 \times 10^{-5}$  s; (e)  $10^{-4}$  s; (f)  $10^{-3}$  s; (g)  $10^{-2}$  s; (h)  $10^{-1}$  s

Fig. 3 2-Distribution of pressure with  $zx$  section at different time: (a)  $10^{-8}$  s; (b)  $10^{-5}$  s; (c)  $3.98 \times 10^{-5}$  s; (d)  $6.31 \times 10^{-5}$  s; (e)  $10^{-4}$  s; (f)  $10^{-3}$  s; (g)  $10^{-2}$  s; (h)  $10^{-1}$  s

压强变化会影响管内流体的运动,图 4 和图 5 分别表示等离子体速度沿  $z$  轴分量(标尺中数值表示大小,正负表示运动的方向)和沿  $x$  轴的分量. 图 4(a)、(b)表明,在  $10^{-8} \sim 10^{-5}$  s 时段内,石英管中流体整体速度的空间分布并无明显变化. 在  $10^{-5} \sim 6.31 \times 10^{-5}$  s 时段内,图 4(b)~(d)表明氩等离子体在石英管中的速度呈扇状分布,速度大小和速度呈扇状分布的区域沿  $z$  轴负方向( $z$  轴箭头表示正方向)不断扩大,这说明其加速度与速度方

向一致,等离子体在  $10^{-5} \sim 6.31 \times 10^{-5}$  s 时间内往  $z$  轴的负方向流动. 在  $10^{-4}$  s 等离子体速度变小,加速度方向改变为沿  $z$  轴正方向,等离子体呈现往  $z$  轴正方向运动趋势. 由图 3(e)所示 BC 区域成为石英管的高压区,高压区抑制了等离子体往  $z$  轴负方向的迁移,故而在  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  s 内,往石英管 BC 侧扩散的高速度分布区域面积和速度大小不断减小. 在  $10^{-2}$  s 之后,速度分布趋近稳定.



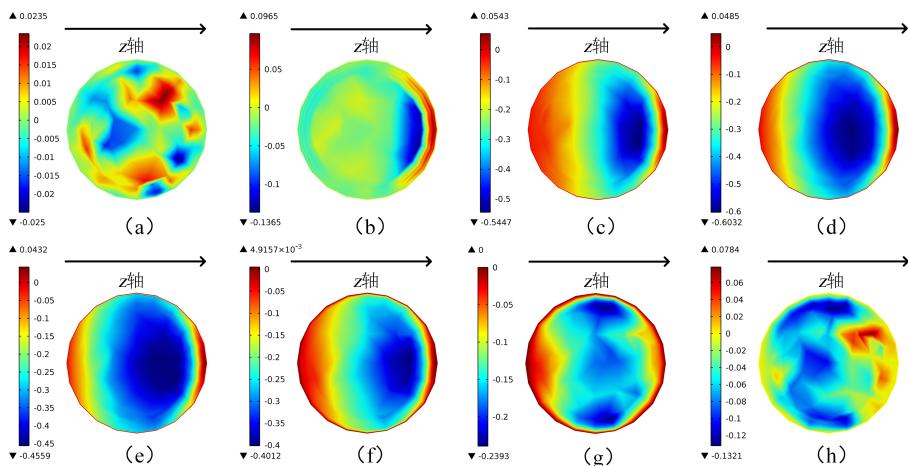


图 4 不同时刻  $y-z$  平面的速度云图: (a)  $10^{-8}$  s; (b)  $10^{-5}$  s; (c)  $3.98 \times 10^{-5}$  s; (d)  $6.31 \times 10^{-5}$  s; (e)  $10^{-4}$  s; (f)  $10^{-3}$  s; (g)  $10^{-2}$  s; (h)  $10^{-1}$  s

Fig. 4 2-D distribution of velocity with  $y-x$  section at different time: (a)  $10^{-8}$  s; (b)  $10^{-5}$  s; (c)  $3.98 \times 10^{-5}$  s; (d)  $6.31 \times 10^{-5}$  s; (e)  $10^{-4}$  s; (f)  $10^{-3}$  s; (g)  $10^{-2}$  s; (h)  $10^{-1}$  s

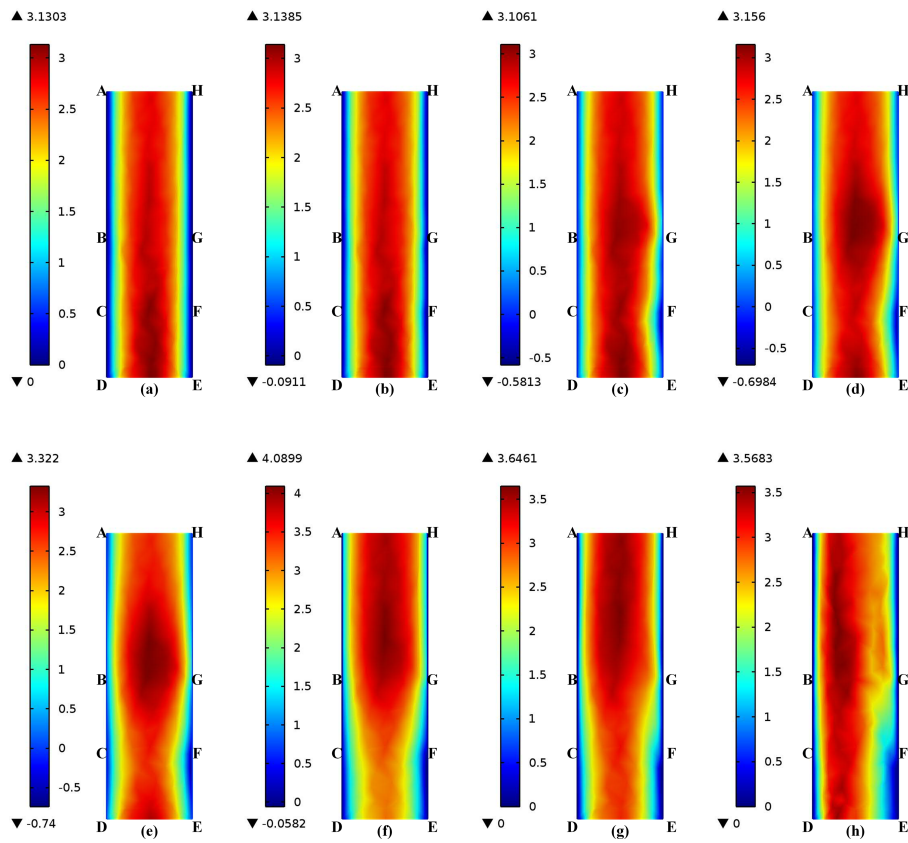


图 5 不同时刻  $x-z$  平面的  $x$  方向速度云图: (a)  $10^{-8}$  s; (b)  $10^{-5}$  s; (c)  $3.98 \times 10^{-5}$  s; (d)  $6.31 \times 10^{-5}$  s; (e)  $10^{-4}$  s; (f)  $10^{-3}$  s; (g)  $10^{-2}$  s; (h)  $10^{-1}$  s

Fig. 5 2-D distribution of velocity with  $x-z$  section at different time: (a)  $10^{-8}$  s; (b)  $10^{-5}$  s; (c)  $3.98 \times 10^{-5}$  s; (d)  $6.31 \times 10^{-5}$  s; (e)  $10^{-4}$  s; (f)  $10^{-3}$  s; (g)  $10^{-2}$  s; (h)  $10^{-1}$  s

图 5 给出了  $10^{-8} \sim 10^{-1}$  s 时间内速度在  $x$  轴方向分量的分布。图 5(a)、(b)表明,在  $10^{-8} \sim 10^{-5}$  s 时段内,石英管中流体整体速度呈现均匀的空间分布,高速区域集中在矩管中间,沿径向往石英管两侧递减,受进气口的影响,石英管底部中间的气

体速度运动最快,最高为 3.13 m/s,呈丝状沿石英管轴向往上递减。图 5(b)~(f)表明等离子体的气体放电影响了右侧激发区域的  $x$  轴向速度,高速区域呈现锥形分布,这可以简化成为一进气窄而出气宽的气管模型,在流量一定的情况下,进气孔径

较小,流速增大、气压减小,因此在  $10^{-4}$  s 时石英管底部的气压值小于标准大气压 180 Pa. 电子碰撞使重粒子加速,等离子体在激发区域上部得到二次加速,所以速度  $x$  分量的最大值停留在激发区域的上部. 而在  $10^{-2}$  s 之后,受到等离子体高温分布的影响,石英管内气体的流动状态连续变化,速度  $x$  轴分量的最大值出现在石英管的左半区域(以石英管为中心,分为左右两区域). 这是因为石英管内温差造成冷区和热区,等等离子体流经热区时遇热加速膨胀、密度减小形成热阻力,造成了热扰流现象. 即流体流经热区所受的压力降大于流经冷区所受的压力,为了保证流体流动方向上截面上压力梯度为零,当流体流经热区时,必须扩大流道,不断地向外挤压流体,使得热流区的流速降低. 对于热区流体来说,密度减小(体积膨胀)的滞止作用体现在使流体减速,并把流体在垂直于流动方向上向外排挤,使等离子体的流线发生“热斥冷吸”的现象,即在热流区时,流线就好像受到向外排斥的力作用;而冷区的流线则受到了吸引力的作用. 这个作用与流体粘性的作用完全一样. 所以,当流动中的流体受热膨胀时,并不总是被加速的.

4 结 论

本文基于流体计算近似和局部热力学平衡假设,利用有限元的方法建立大气压微波等离子体三维模型,在微波功率为 500 W 下,气体流量为 40 slpm,初始气体温度为 473.15 K 的工作条件下,仿真了  $0\sim10^{-1}$  s 内大气压氩等离子体受传热与流动影响的温度、压强和等离子体速度的空间瞬态分布特征. 并分析了分析流线、流速与温度的关系. 主要得出以下结论:轴向进气模式下的微波等离子体气体温度呈现空间非均匀分布,而轴向进气在热流体的对流传热中使得热量没有往石英管中心转移,而是往石英管壁转移,易造成石英管热损伤,缩短石英管使用寿命;局部温差造成石英管内热区的等离子体密度减小、热阻变大,影响了等离子体流体流向和流速,形成了“热斥冷吸”的热扰流现象,

这导致了流体高温区域的流速减缓. 研究石英管内温度及流场分布,可以为等离子体炬的设计和優化提供参考.

参考文献:

[1] 克日什托夫 J, 杨科夫斯基. 微波诱导等离子体原子光谱分析 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2015.

[2] Friedman G, Gutsol A, Shekhter A B, *et al.* Applied plasma medicine [J]. Plasma Proc Polym, 2008, 5: 503.

[3] Cho S C, Uhm H S, Hong Y C, *et al.* Elimination of dimethyl methylphosphonate by plasma flame made of microwave plasma and burning hydrocarbon fuel [J]. J Appl Phys, 2008, 103: 370.

[4] Ko Y, Yang G, Chang D P Y, *et al.* Microwave plasma conversion of volatile organic compounds [J]. J Air Waste Manag Assoc, 2003, 53: 580.

[5] 过增元. 热流体力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.

[6] 曹修全, 余德平, 向勇, 等. 等离子体发生器结构对热效率的影响 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2016, 48: 178.

[7] Peng H, Xi C. Modeling of the subsonic-supersonic flow and heat transfer in a DC arc plasma torch [J]. Plasma Chem Plasma Proc, 2001, 21: 249.

[8] 金英俊, 罗康, 易红亮, 等. 采用双分布函数格子 Boltzmann 方法的直流亚等离子体流动与传热分析 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37: 830.

[9] Gadonna K, Leroy O, Boisselauporte C, *et al.* Study of a microwave plasma torch [J]. Eur Phys J Appl Phys, 2011, 56: 669.

[10] Yang Y, Hua W, Guo S Y. Numerical study on microwave-sustained argon discharge under atmospheric pressure [J]. Phys Plasmas, 2014, 21: 040702.

[11] Zhao G L, Hua W, Guo S Y, *et al.* Three-dimensional simulation of microwave-induced helium plasma under atmospheric pressure [J]. Phys Plasmas, 2016, 23: 073503.

引用本文格式:  
中 文: 高鑫鑫, 华伟, 张弘, 等. Ar-MIP 在石英管内传热与流动特征研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 703.  
英 文: Gao X X, Hua W, Zhang H, *et al.* Study on heat transfer and flow characteristics of Ar-MIP [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2019, 56: 703.