

基于湍流模型的DC-RF混合等离子体流动及传热特性研究

陈文波¹ 李自军¹ 陈伦江³ 冯军² 阳璞琼¹

1(南华大学 电气工程学院 衡阳 421001)

2(南华大学 机械工程学院 衡阳 421001)

3(核工业西南物理研究院 成都 610041)

摘要 直流-射频(Direct Current-Radio Frequency, DC-RF)混合等离子体具有高温、高化学活性等特点,在核用超细粉末材料制备领域有着广阔的应用前景。对这种混合等离子体的特性进行研究,可以为等离子体发生器装置的设计及稳定运行提供参考。本文采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,对DC-RF混合等离子体发生器内的热等离子体的温度及流场空间分布进行模拟,并在此基础上分析了各工作参数对混合等离子体流动及传热特性的影响。模拟结果表明:提高DC弧电流、增大反应气及冷却气流量均能减弱混合等离子体发生器入口处的回流效应;提升RF线圈电流则能增加RF线圈附近的等离子体温度及高温弧区面积,但过大的气流量及过高的线圈电流会对发生器装置的正常工作产生不利影响。因此,需要合理调节各种工作参数来改变混合等离子体的流场分布,从而在保证装置稳定运行的前提下满足不同材料处理的需求。

关键词 直流-射频混合等离子体, 湍流模型, 温度, 流场, 数值模拟

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100501

Analysis of flow and heat-transfer characteristics of DC-RF hybrid plasma based on turbulence model

CHEN Wenbo¹ LI Zijun¹ CHEN Lunjiang³ FENG Jun² YANG Puqiong¹

1(College of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

2(College of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

3(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract [Background] Direct-current radiofrequency (DC-RF) hybrid plasma has broad application prospects in the field of nuclear ultrafine powder material preparation owing to its characteristics of high temperature and high chemical activity. [Purpose] This study aims to explore the flow and heat-transfer characteristics of DC-RF hybrid plasma, so as to provide references for the design and stable operation of the plasma generator device. [Methods]

国家磁约束核聚变能发展研究专项项目(No.2019YFE03070000)、国家磁约束核聚变能发展研究专项项目(No.2018YFE03131000)、国家自然科学基金面上项目(No.12275121)资助

第一作者: 陈文波, 男, 1983年出生, 2018年于核工业西南物理研究院获博士学位, 研究领域为低温等离子体及应用

通信作者: 冯军, E-mail: speedfjkang@163.com; 阳璞琼, E-mail: yangpuqiong@usc.edu.cn

收稿日期: 2023-03-22, 修回日期: 2023-06-22

Supported by National Special Project on Magnetically Confined Nuclear Fusion Energy Development (No.2019YFE03070000), National Special Project on Magnetically Confined Nuclear Fusion Energy Development (No.2018YFE03131000), National Natural Science Foundation of China (No.12275121)

First author: CHEN Wenbo, male, born in 1983, graduated from the Southwest Institute of Physics with a doctoral degree in 2018, focusing on low-temperature plasma and its applications

Corresponding author: FENG Jun, E-mail: speedfjkang@163.com; YANG Puqiong, E-mail: yangpuqiong@usc.edu.cn

Received date: 2023-03-22, revised date: 2023-06-22

First of all, the hybrid plasma generator was assumed to be a two-dimensional axisymmetric model, and the device was filled with pure argon plasma in a local thermodynamic equilibrium (LTE), steady, and turbulent flow state. Then, the ANSYS FLUENT software was employed to establish a two-dimensional model for the DC-RF hybrid plasma torch structure, and the spatial distributions of the temperature and flow field in DC-RF hybrid plasma torch were simulated using the $k-\varepsilon$ turbulence model with SIMPLE algorithm based on velocity and pressure coupling solver. Finally, the effects of changes in the operating parameters were analyzed based on these results. **[Results & Conclusions]** The simulation results indicate that increases in the DC arc current, reaction gas flow rate, and cooling gas flow rate can reduce backflow effects at the entrance of hybrid plasma torch. The temperature and area of the plasma arc near the RF coil increase with the RF coil current. However, an excessive current and gas flow rate may adversely affect the operation of the device. Various requirements of material handling processes on the premise of stable operation of the device can be satisfied by adjusting working parameters for the control of the hybrid plasma flow field profiles.

Key words DC-RF hybrid plasma, Turbulence model, Temperature, Flow field, Numerical simulation

射频(Radio Frequency, RF)等离子体(又称高频感应等离子体)是一种低流速、高温(宏观温度可达 10^4 K)、高化学活性(富含高能电子、离子、激发态原子等活性粒子)的洁净热源。由于它可以将送入射频等离子体发生器装置中的原料瞬间加热至完全熔融,甚至汽化,并轻易实现一些常温下难以发生的化学反应,因此,目前已被应用于核用碳化物、硼化物及核燃料氧化物粉末材料的制备领域^[1]。然而,当射频等离子体装置处于工作状态时,其气体入口处会在电磁力的作用下形成回流区,这将使注入装置内的原料颗粒的运动轨迹偏离等离子体高温区域,无法被充分加热,从而影响到材料的最终处理效果^[2]。

为了解决上述问题,一些研究者提出了一种将直流(Direct Current, DC)等离子体和射频等离子体发生器级联而成的新型直流-射频(Direct-Current Radio Frequency, DC-RF)混合等离子体装置^[3]。他们的研究表明,这种混合等离子体电弧的体积更大,焓值更高,同时还能有效抑制射频等离子体的回流效应,使得进入其中的反应物料在高温区域内停留的时间更长、受热更充分,进而改善最终产物的品质。但是,受DC等离子体与RF等离子体之间强的相互作用影响,DC-RF混合等离子体射流的流动结构十分复杂,这将导致其下游的RF等离子体变得极不稳定,容易在工作时熄灭^[4]。因此,开展DC-RF混合等离子体的流动及传热特性的研究工作对于等离子体发生器装置的稳定运行有着十分重要的现实意义。

目前,国内外已有多个研究小组从实验诊断和数值模拟两方面入手,对DC-RF混合等离子体的特性展开研究。实验方面,Nishiyama等^[5]已建立了DC-RF混合等离子体发生器系统,利用焓探针对流

合热等离子体的焓值和能量密度等参量进行了测量^[6],并利用发射光谱法探究了热等离子体中所包含的活性粒子^[7]。此外,他们还系统研究了工作气体成分^[8-9]、气体流量^[10]、工作压强^[11]、输入功率^[12]等参数的影响效应。然而,由于发生器装置内部空间狭小,放电实验过程中所产生的热等离子体温度极高,同时射频电磁场还会对测试设备的运行产生强烈的干扰,使之难以获得可靠的实验数据。所以,数值模拟就成为了研究热等离子体性质更为直观有效的手段。

Toyonobu等率先建立了DC-RF混合等离子体的理论模型,并在此基础上理论研究了RF线圈电流大小^[13]及线圈电流方向^[14]对等离子体温度及流场分布的影响。McKellget等^[15]同样采用二维模型对混合等离子体流动及传热特性受RF功率的影响效应进行了研究,但他们在计算过程中均将直流等离子体对混合等离子体流的贡献简化为射频等离子体的入口边界条件。为此,一些学者建立了DC-RF混合等离子体的一体化数值模型,求解并分析了与直流电弧相关操作参数的改变对热等离子体流动特性^[16-17]的影响效应。但是,这些研究均是在假设热等离子体为层流流动的情况下进行的,而在实际放电过程中,热等离子体的温度和速度梯度很高,通常处于湍流流动状态。所以,有必要采用湍流模型重新研究各种工作参数对混合热等离子体流动和传热特性的影响,从而获得更加能够反映实验中真实情况的计算结果。

本文将自行设计的用于粉末球化及纳米颗粒合成的DC-RF混合等离子体发生器为研究对象,利用商业流体力学软件ANSYS FLUENT研究各种操作参数的改变对混合等离子体特性的影响规律,以期对DC-RF等离子体发生器装置的设计及稳定运

行提供参考。

1 数值模型

1.1 控制方程组

DC-RF 混合热等离子体同样可以看作具有导电特性的流体,因此也可以利用磁流体理论来对其进行研究。为了简化计算求解过程,本文在进行数值模拟时假设混合等离子体发生器为二维轴对称模型;装置内填充的是纯氩等离子体且处于局域热力学平衡(Local Thermodynamic Equilibrium, LTE)、定常和湍流流动状态;忽略电磁场方程中的位移电流项以及能量方程的黏滞损耗项,并认为等离子体的辐射热损耗仅与温度相关。则柱坐标系下的控制方程组可以写为^[18-19]:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho v)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程(轴向):

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho vu)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + 2\frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\mu_{\text{eff}}(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z})] + F_z^{\text{RF}} + F_z^{\text{DC}} \quad (2)$$

动量守恒方程(径向):

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho vv)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} [\mu_{\text{eff}}(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z})] - 2\mu_{\text{eff}} \frac{v}{r^2} + F_r^{\text{RF}} + F_r^{\text{DC}} \quad (3)$$

式中: u 和 v 分别代表轴向速度及径向速度分量; ρ 表示等离子体密度; P 代表压力; $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ 代表等效黏度,其中 μ 为分子黏度, $\mu_t = C_u \rho k^2 / \varepsilon$ 为湍流黏度; F_z^{RF} 、 F_z^{DC} 、 F_r^{RF} 和 F_r^{DC} 分别为RF和DC电磁场产生的轴向洛伦兹力和径向洛伦兹力。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho uh)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho vh)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial h}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial h}{\partial r}) + Q_j^{\text{RF}} + Q_j^{\text{DC}} - Q_R \quad (4)$$

式中: h 代表等离子体的焓值; $\Gamma_{\text{eff}} = (\lambda/c_p) + (\mu_v/Pr_t)$ 代表等效输运系数,其中, Pr_t 为湍流的普朗特数; λ 为热导率; c_p 为比热容; Q_R 表示辐射热损耗; Q_j^{RF} 和 Q_j^{DC} 分别表示RF和DC电流产生的焦耳热。

标准 k - ε 方程:

$$\rho(u \frac{\partial k}{\partial z} + v \frac{\partial k}{\partial r}) = \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial r}) + G - \rho\varepsilon \quad (5)$$

$$\rho(u \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial r}) = \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial r}) + C_{\varepsilon 1} G \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: $\Gamma_k = \mu_t + (\mu_v/Pr_k)$, $\Gamma_\varepsilon = \mu_t + (\mu_v/Pr_\varepsilon)$ 分别表示湍流动能 k 及耗散率 ε 的复合输运系数; G 表示湍流动能的产生率。

RF 电磁场方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \frac{\partial E_\theta^{\text{RF}}}{\partial r}) + \frac{\partial^2 E_\theta^{\text{RF}}}{\partial z^2} - \frac{E_\theta^{\text{RF}}}{r^2} = i\omega\mu_0(\sigma E_\theta^{\text{RF}} + J_c) \quad (7)$$

$$B_r^{\text{RF}} = \frac{1}{i\omega} \frac{\partial E_\theta^{\text{RF}}}{\partial z}, \quad B_z^{\text{RF}} = -\frac{1}{i\omega} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rE_\theta^{\text{RF}}) \quad (8)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; $\omega = 2\pi f$ 代表圆频率(f 为RF线圈频率); J_c 代表RF线圈内的电流密度; σ 代表等离子体的电导率。

DC 电磁场方程:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\sigma r \frac{\partial \varphi}{\partial r}) = 0 \quad (9)$$

$$j_z = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad j_r = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (10)$$

$$\nabla \times B_\theta^{\text{DC}} = \mu_0 j \quad (11)$$

式中: φ 表示直流电弧的电势; j 为DC电弧电流密度(j_z 和 j_r 分别为其轴向及径向分量)。

上述参量与RF电场 E_θ^{RF} 、轴向磁场 B_r^{RF} 、径向磁场 B_z^{RF} 以及DC磁场 B_θ^{DC} 、弧电流密度 j 之间的关系为:

$$F_z^{\text{RF}} = -\frac{\sigma(T)}{2} \text{Re}(E_\theta^{\text{RF}} B_r^{\text{RF}*}) \quad (12)$$

$$F_r^{\text{RF}} = \frac{\sigma(T)}{2} \text{Re}(E_\theta^{\text{RF}} B_z^{\text{RF}*}) \quad (13)$$

$$Q_j^{\text{RF}} = \frac{\sigma(T)}{2} |E_\theta^{\text{RF}}|^2 \quad (14)$$

$$F_r^{\text{DC}} = \frac{1}{2} j_z B_\theta^{\text{DC}} \quad (15)$$

$$F_r^{\text{DC}} = -\frac{1}{2} j_r B_\theta^{\text{DC}} \quad (16)$$

$$Q_j^{\text{DC}} = \frac{1}{2\sigma} (j_r^2 + j_z^2) \quad (17)$$

1.2 计算区域及模拟方法

本文在进行数值模拟时所采用的DC-RF混合等离子体发生器结构如图1(a)所示,该装置由一个DC等离子体与RF等离子体发生器串联而成。气流量为 Q_R 的反应气(Plasma Gas)沿截面积为 A_{DC} 的DC等离子体发生器入口处注入,气流量为 Q_C 的冷却气(Cooling Gas)沿RF发生器约束陶瓷外管的内壁注入,其入口处的截面积为 A_{RF} 。利用ANSYS FLUENT软件建立二维模型,并对整个计算区域进行剖分后得到如图1(b)所示的网格示意图。将RF

电磁场方程(7)及DC电磁场方程(11)通过用户自定义标量(User Defined Scalar, UDS)技术加入FLUENT中进行求解。并利用用户自定义函数技术将等离子体的热力学系数及输运系数^[20]和控制方程组(2~4)中的各源项引入FLUENT求解器中,计算获得RF-DC混合等离子体发生器内部温度及流场的空间分布。在数值计算过程中,所有的方程均采用二阶迎风格式进行离散,并采用基于速度和压力耦合求解器的SIMPLE算法进行求解。

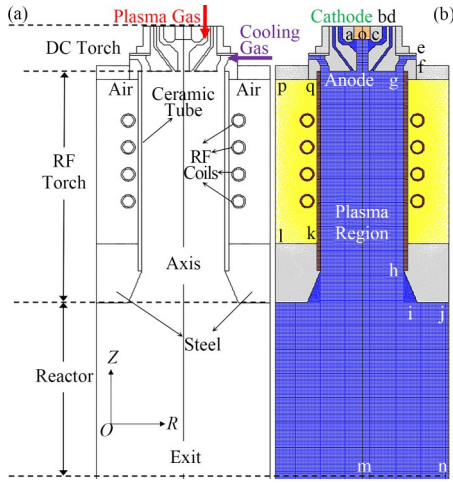


图1 DC-RF等离子体发生器结构(a)及网格(b)示意图
Fig.1 Schematic of the DC-RF hybrid plasma torch structure (a) and grid (b)

1.3 边界条件

为了对上述方程组进行求解并得到合理的结果,还应给定合适的边界条件。本文计算时采用的边界条件如下所示^[20]:

1)反应气入口(bd)及冷却气入口(ef):

$$u = \begin{cases} Q_R/A_{DC} & (bd) \\ Q_C/A_{RF} & (ef) \end{cases}$$

$$v = \frac{\partial E_{\theta}^{RF}}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0; T = 300 K$$

$$k = 0.005u^2; \varepsilon = 0.1k^2$$

2)反应室出口(mn):

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial E_{\theta}^{RF}}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial h}{\partial z} = 0$$

3)中轴线(om):

$$\frac{\partial u}{\partial r} = v = E_{\theta}^{RF} = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = \frac{\partial h}{\partial r} = 0$$

4)DC等离子体发生器阴极表面(aoc):

$$v = u = k = \varepsilon = 0, T = 3500 K$$

$$E_{\theta}^{RF} = 0, \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{I_{DC}}{A_{ca}}$$

式中: I_{DC} 为直流弧电流; A_{ca} 为阴极截面积。

5)DC等离子体发生器阳极表面(aoc):

$$v = u = E_{\theta}^{RF} = \phi = k = \varepsilon = 0, T = 300 K$$

6)陶瓷管及不锈钢壁面(gh,hi,ij,jn,pq,lk):

$$v = u = E_{\theta}^{RF} = \frac{\partial \phi}{\partial z} = k = \varepsilon = 0, T = 300 K$$

7)空气边界(pl):

$$E_{\theta}^{RF} = \phi = 0, T = 300 K$$

2 结果与讨论

2.1 层流模型与湍流模型比较

首先,考查湍流模型对DC-RF混合等离子体特性的影响效应,图2分别给出了利用湍流模型和层流模型计算得到的混合等离子体温度 T 、轴向速度 V_z 及流场的空间分布(计算时假设当RF线圈电流为255 A,线圈频率为3 MHz,DC弧电流为100 A;反应气流量为10 L·min⁻¹,冷却气流量为46 L·min⁻¹)。由图2(a)可以看出,由湍流模型计算得到的热等离子体体积更小,且所能达到的最高温度也更低,这与文献[21]所得出的结论类似。此外,如图2(b)所示,采用湍流模型计算得到的轴向速度最大值要略小于层流模型,且速度极值分布区域更小,但在湍流模型计算结果中,冷却气入口处的回流效应几乎消失且反应室内的回流区域大大减小。

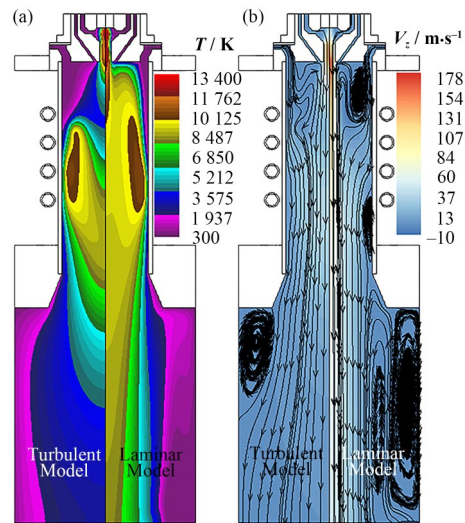


图2 湍流模型(a)及层流模型(b)的模拟结果
Fig.2 Simulation results of the turbulent model (a) and laminar model (b)

2.2 DC电弧电流 I_{DC} 的影响

下面首先研究DC电弧电流 I_{DC} 对DC-RF混合等离子体特性的影响效应。研究时仅假设 I_{DC} 在0~250 A内变化,而其余参数均与§2.1的设置相同。计算获得的温度和流场空间分布结果依次列于图3~5中。

由这些计算结果可以看出,当DC弧电流 I_{DC} 增大时,DC发生器内产生的电弧长度增长,等离子体温度 T 及轴向速度 V_z 均不断增高,RF发生器入口处的回流区尺寸也不断减小。当弧电流 I_{DC} 提升到250 A时,DC发生器阴极附近的等离子体温度峰值上升到15 000 K左右,等离子体轴向速度峰值则达到了201 $m \cdot s^{-1}$,同时,高速的DC电弧射流已延伸至RF等离子体内部的高温区域,使RF发生器入口处的回流效应几乎消失。受等离子体轴向速度增加及回流效应减弱的影响,发生器内产生的大部分热等离子体无法通过涡流向上输送,导致等离子体高温区逐渐呈现向RF发生器两侧的陶瓷管壁及其下游区域移动的趋势。

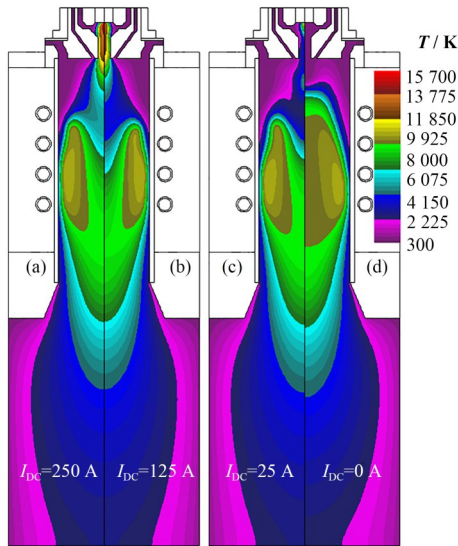


图3 不同DC电弧电流下的温度分布云图
Fig.3 Spatial distribution contours of the temperature under different DC arc currents

此外,结合图5的等离子体速度沿发生器轴向分布的计算结果可知,由DC弧电流增加所引起的等离子体轴向速度及温度的变化主要体现在DC发生器阴极至RF发生器末匝线圈附近,而对其他区域内温度及流场分布的影响并不大。

2.3 反应气流量 Q_R 的影响

图6~8给出了反应气流量 Q_R 在5~30 $L \cdot \min^{-1}$ 内变化时,DC-RF混合等离子体的流场和温度分布的计算结果。计算时其余参数的设置与§2.1相同。

图6给出混合等离子体流场及温度分布云图,可以看出,提高反应气体流量同样会使DC等离子体速度增加、电弧射流长度增长且向中轴线处集中,同时减小发生器入口处的回流区尺寸——当反应气体流量为5 $L \cdot \min^{-1}$ 时,尽管引入了DC电弧,RF发生器入口处仍有较强的回流效应;而当 Q_R 增大到

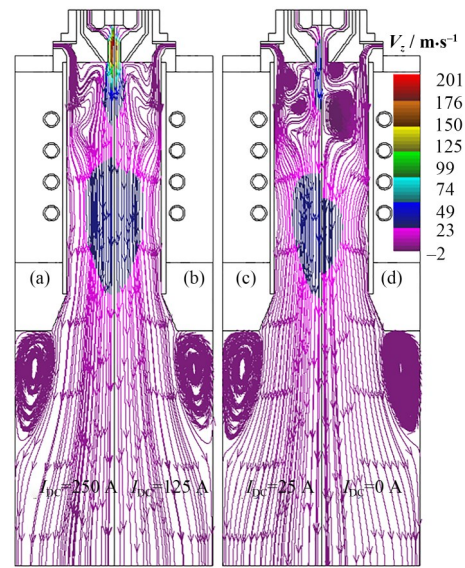


图4 不同DC电弧电流下的流场分布
Fig.4 Spatial distributions of the flow field under different DC arc currents

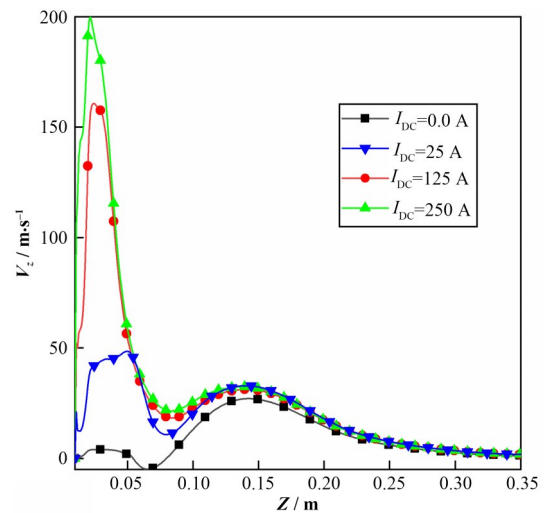


图5 不同DC弧电流下等离子体速度沿轴向分布曲线
Fig.5 Distributions of the plasma velocity along the axis direction under different DC arc currents

10 $L \cdot \min^{-1}$ 时,发生器入口处的回流效应已明显减弱。但继续增大反应气体流量至30 $L \cdot \min^{-1}$ 时,发生器轴线附近的等离子体速度会迅速升高至450 $m \cdot s^{-1}$ 左右,陶瓷管壁面处的回流效应也随之增强,并在第二匝RF线圈位置附近重新形成回流区。同时,高速的DC电弧射流还会深入到RF等离子体的内部,将下游的高温弧区从轴线处分开,并使之向发生器的边缘处靠拢。根据这一现象,本文再次给出了等离子体温度沿发生器约束陶瓷管内壁面分布的计算结果(图7)。从图7可以看出,过高的反应气流量还可能使陶瓷管内壁的温度升高,进而导致其因承受过高的温度或过大的热应力而发生裂管的现象,影响

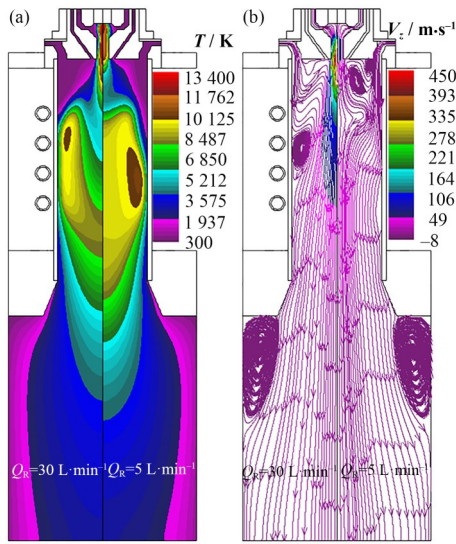


图6 反应气流量 Q_R 为 $30\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (a)及 $5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (b)时温度及流场分布的计算结果

Fig.6 Calculated distributions of the temperature and flow field with plasma gas rate $Q_R = 30\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (a) and $5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (b)

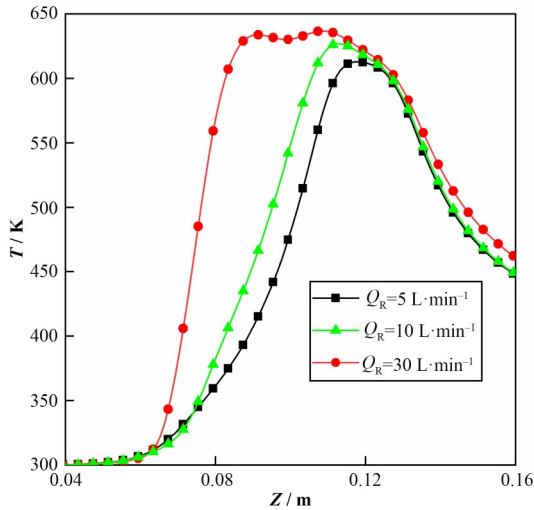


图7 不同反应气流量下轴向温度沿RF等离子体发生器外管内壁面分布曲线

Fig.7 Distributions of axial temperature along the outer torch wall with different Q_R values

发生器的正常工作。

图8的计算结果表明,发生器轴线附近的等离子体轴向速度会随反应气流量的升高而增大,但这一影响规律仅限于RF等离子体发生器区域内。

2.4 冷却气流量 Q_C 的影响

接下来研究冷却气流量 Q_C 对混合等离子体特性的影响。研究时假设 Q_C 分别为 $92\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $23\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

由图9给出的计算结果可以看出,RF等离子体发生器上游的大部分流线会随着冷却气流量的增加

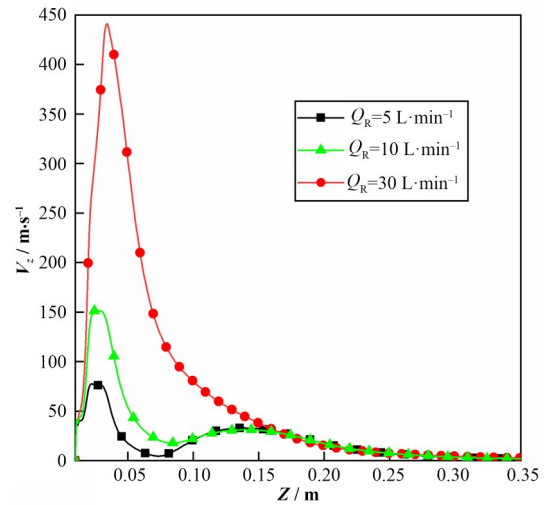


图8 不同反应气流量下等离子体速度沿轴向分布曲线
Fig.8 Distributions of the plasma velocity along the axis direction with different Q_R values

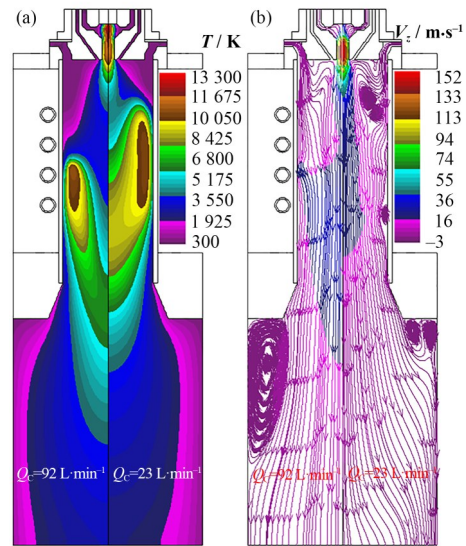


图9 冷却气流量 Q_C 为 $92\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (a)及 $23\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (b)时温度及流场分布的计算结果

Fig.9 Calculated distributions of the temperature and flow field with cooling gas rate $Q_C = 92\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (a) and $23\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (b)

而被逐步压缩到发生器的陶瓷外管面壁附近,从而使由RF发生器入口处流向RF线圈区域的回流急剧减少。此外,处于RF发生器内的等离子体温度随着冷却气流量的增加而不断下降,高温弧区尺寸持续缩小且向下游快速移动,当反应冷却气流量增大到 $92\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,整个弧区已被推进至RF发生器第三匝线圈位置附近。这说明在放电实验过程中,若冷却气流量增过大,可能会导致装置内的RF电弧熄灭。但图10中的等离子体温度沿外管内壁分布的计算结果却又表明,冷却气流量的增加不但能减少等离子体发生器上游的回流效应,而且还能在一定

程度上降低发生器陶瓷外管的壁面温度,避免“裂管”现象的发生。因此,从保证装置稳定运行的角度考虑,应将冷却气流量保持在 $46 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右为宜。

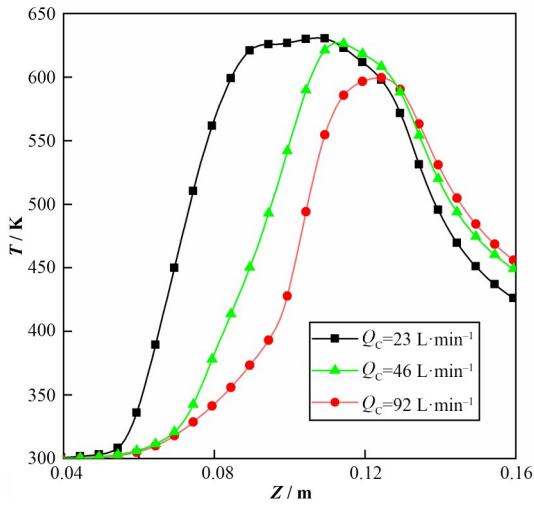


图10 不同冷却气流量下温度沿RF等离子体发生器外管内壁面轴向分布的曲线

Fig.10 Distributions of the temperature along the outer torch wall in the axis direction with different Q_c values

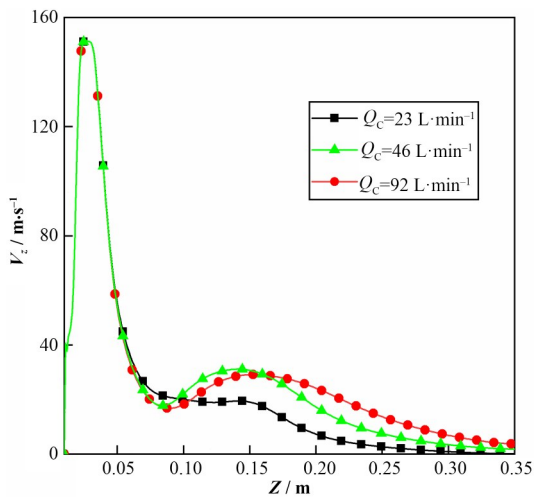


图11 不同冷却气流量下等离子体速度沿轴向分布曲线

Fig.11 Distributions of the plasma velocity along the axis direction with different Q_c values

此外,结合图11的等离子体速度沿发生器轴向分布的计算结果可知,冷却气流量的变化主要对RF发生器内的等离子体特性有较大的影响——该区域内的等离子体轴向速度会随冷却气流量的增加而有所提升,而温度却有明显的下降。

2.5 RF线圈电流 I_{RF} 的影响

最后对RF线圈电流 I_{RF} 在215~295 A范围内变化,而其他工作参数均与§2.1相同时,DC-RF混合等离子体发生器内流场和温度的空间分布进行计算。计算结果依次列于图12~14中。

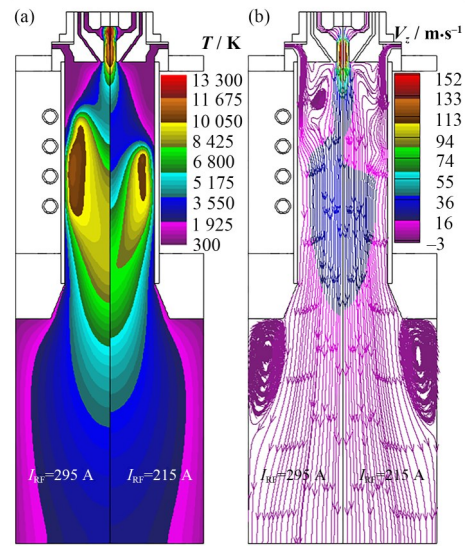


图12 线圈电流 I_{RF} 为295 A (a) 及215 A (b) 时温度及流场分布的计算结果

Fig.12 Calculated distributions of the temperature and flow field with coil current $I_{RF} = 295 \text{ A}$ (a) and 215 A (b)

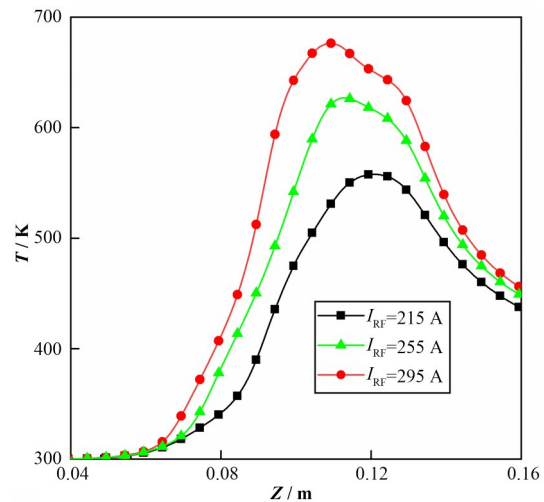


图13 不同线圈电流下轴向温度沿RF等离子体发生器外管内壁面的分布曲线

Fig.13 Distributions of axial temperature along the outer torch wall with different I_{RF} values

图12的计算结果表明,在RF线圈电流较低的情况下($I_{RF}=215 \text{ A}$),DC电弧射流的轴向流动将RF等离子体的高温弧区推至发生器装置的下游,此时混合等离子体发生器轴线附近温度的升高主要来自DC电弧加热,而RF功率的贡献可以忽略不计。随着RF线圈电流的增加,装置内的等离子体温度上升,电弧体积逐渐扩大,并向发生器边缘靠拢,这将导致约束陶瓷管因其内表面局部温度的急剧上升而破裂(图13)。而RF线圈电流的增加还会增加发生器入口处洛仑兹力的径向分量,使得该位置处的回流效应随 I_{RF} 的升高而增大。

此外,结合图14的计算结果可知,RF线圈电流的变化同样只对RF发生器内的等离子体特性有较大的影响——即该区域内的等离子体温度及轴向速度均随 I_{RF} 的增加而增大。

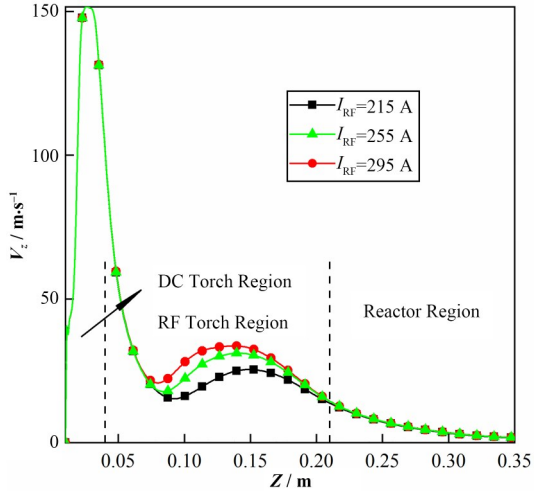


图14 不同RF线圈电流下等离子体速度沿轴向分布曲线
Fig.14 Distributions of the plasma velocity along the axis direction with different I_{RF} values

3 结语

1)提高DC电弧电流能有效减弱混合等离子体发生器入口处的回流效应,并提升装置上游的等离子体温度及轴向速度,但线圈区域附近的速度依然较低。这种流场能使进入混合等离子体中的粉末材料在高温区内停留时间足够长,从而被充分加热。

2)增大反应气及冷却气流量均有助于减弱发生器入口处的回流效应。但反应气流量过高会使RF线圈附近形成回流区,并可能导致约束陶瓷管因内壁温度过高而发生裂管;而冷却气流量过高则会导致RF电弧熄灭的现象产生。

3)提升RF线圈电流能够提高线圈附近的等离子体温度,扩大高温弧区的面积,但会使发生器入口处重新形成回流区,并使陶瓷管壁面温度升高,对发生器装置的使用寿命产生不利的影响。因此,根据本文计算结果,在当前工作条件下,应调整 I_{DC} 至100 A, Q_R 为 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, Q_C 为 $46 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, I_{RF} 在255 A左右,以保证实验过程中装置的稳定运行。

作者贡献声明 陈文波负责理论模型设计、结果分析,理论验证及文章撰写;李自军进行程序编写、结果可视化及数据分析;陈伦江参与理论模型设计、理论指导;冯军提出研究思路、研究资金获取、文章审阅及修订;阳璞琼提出研究思路、研究资金获取。

参考文献

- 1 图马诺夫. 等离子体和感应加热技术在核燃料循环中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021: 287 - 359.
Tumanov. Application of plasma and induction heating technology in the nuclear fuel cycle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021: 287 - 359.
- 2 Solonenko O P, Nishiyama H, Smirnov A V, *et al.* Visualization of arc and plasma flow patterns for advanced material processing[J]. Journal of Visualization, 2015, **18**(1): 1 - 15. DOI: 10.1007/s12650-014-0221-6.
- 3 Kim K S, Seo J H, Nam J S, *et al.* Production of hydrogen and carbon black by methane decomposition using DC-RF hybrid thermal plasmas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, **33**(2): 813 - 823. DOI: 10.1109/TPS.2005.844526.
- 4 Tanaka Y. Recent development of new inductively coupled thermal plasmas for materials processing[J]. Advances in Physics: X, 2021, **6**(1): 1867637. DOI: 10.1080/23746149.2020.1867637.
- 5 Kawajiri K, Sato T, Nishiyama H. Experimental analysis of a DC-RF hybrid plasma flow[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, **171**(1 - 3): 134 - 139. DOI: 10.1016/S0257-8972(03)00256-1.
- 6 Jang J, Takana H, Solonenko O P, *et al.* Advancement of powder spheroidization process using a small power DC-RF hybrid plasma flow system by sinusoidal gas injection [J]. Journal of Fluid Science and Technology, 2011, **6**(5): 729 - 739. DOI: 10.1299/jfst.6.729.
- 7 Jang J, Takana H, Park S, *et al.* Advancement of in-flight alumina powder spheroidization process with water droplet injection using a small power DC-RF hybrid plasma flow system[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, **21**(5): 900 - 907. DOI: 10.1007/s11666-012-9751-4.
- 8 Takana H, Jang J, Igawa J, *et al.* Improvement of in-flight alumina spheroidization process using a small power argon DC-RF hybrid plasma flow system by helium mixture[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, **20**(3): 432 - 439. DOI: 10.1007/s11666-010-9547-3.
- 9 Jang J, Takana H, Ando Y, *et al.* Preparation of carbon-doped TiO_2 nanopowder synthesized by droplet injection of solution precursor in a DC-RF hybrid plasma flow system[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2013, **22**(6): 974 - 982. DOI: 10.1007/s11666-013-9941-8.
- 10 Kawajiri K, Nishiyama H. In-flight particle characteristics

- in a DC-RF hybrid plasma flow system[J]. *Thin Solid Films*, 2006, **506** - **507**: 660 - 664. DOI: [10.1016/j.tsf.2005.08.360](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.08.360).
- 11 Nishiyama H, Onodera M, Igawa J, *et al.* Characterization of in-flight processing of alumina powder using a DC-RF hybrid plasma flow system at constant low operating power[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, **18** (4): 593 - 599. DOI: [10.1007/s11666-009-9358-6](https://doi.org/10.1007/s11666-009-9358-6).
- 12 Kawajiri K, Ramachandran K, Nishiyama H. Statistical optimization of a DC-RF hybrid plasma flow system for in-flight particle treatment[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(1): 183 - 190. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.07.037](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.07.037).
- 13 Yoshida T, Tani T, Nishimura H, *et al.* Characterization of a hybrid plasma and its application to a chemical synthesis [J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, **54**(2): 640 - 646. DOI: [10.1063/1.332070](https://doi.org/10.1063/1.332070).
- 14 Nam S W, Nishiyama H, Kamiyama S I. Numerical analysis on plasma spraying in a DC-RF hybrid plasma reactor[J]. *JSME International Journal Series B*, 1996, **39** (1): 134 - 140. DOI: [10.1299/jsmeb.39.134](https://doi.org/10.1299/jsmeb.39.134).
- 15 McKelliget J W, El-Kaddah N. Modeling of materials synthesis in hybrid plasma reactors: production of silicon by thermal decomposition of SiCl_4 [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1990, **21**(3): 589 - 598. DOI: [10.1007/BF02667872](https://doi.org/10.1007/BF02667872).
- 16 Seo J H, Park J M, Hong S H. Influence of DC arc jets on flow fields analyzed by an integrated numerical model for a DC-RF hybrid plasma[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2008, **17**(2): 025011. DOI: [10.1088/0963-0252/17/2/025011](https://doi.org/10.1088/0963-0252/17/2/025011).
- 17 Seo J H, Park J M, Hong S H. Thermal plasma flow and equivalent circuit analyses on the electrical coupling of a DC-RF hybrid plasma torch[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2009, **54**(1): 94 - 104. DOI: [10.3938/jkps.54.94](https://doi.org/10.3938/jkps.54.94).
- 18 陈文波, 陈伦江, 刘川东, 等. 工作频率及装置结构对射频感应等离子体特性影响的数值研究[J]. *高电压技术*, 2019, **45**(1): 316 - 323. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20181229030](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20181229030).
CHEN Wenbo, CHEN Lunjiang, LIU Chuandong, *et al.* Numerical study on influence of operating frequency and plasma torch structure on characteristics of radio-frequency-inductive coupled plasma[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, **45**(1): 316 - 323. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20181229030](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20181229030).
- 19 陈伦江, 唐德礼, 程昌明, 等. 双阳极电弧等离子体炬的磁流体动力学分析[J]. *高电压技术*, 2013, **39**(7): 1724 - 1728. DOI: [10.3969/j.issn.1003-6520.2013.07.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6520.2013.07.028).
CHEN Lunjiang, TANG Deli, CHENG Changming, *et al.* Magneto hydrodynamics analysis of a dual anode arc plasma torch[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, **39**(7): 1724 - 1728. DOI: [10.3969/j.issn.1003-6520.2013.07.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6520.2013.07.028).
- 20 Murphy A B, Arundell C J. Transport coefficients of argon, nitrogen, oxygen, argon-nitrogen, and argon-oxygen plasmas[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1994, **14**(4): 451 - 490. DOI: [10.1007/BF01570207](https://doi.org/10.1007/BF01570207).
- 21 Punjabi S B, Sahasrabudhe S N, Joshi N K, *et al.* Comparative study of laminar and turbulent flow model with different operating parameters for radio frequency-inductively coupled plasma torch working at 3 MHz frequency at atmospheric pressure[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, **21**(1): 013506. DOI: [10.1063/1.4862238](https://doi.org/10.1063/1.4862238).