



·脉冲功率技术·

## 电弧射流激励器工作特性仿真研究<sup>\*</sup>

袁 野<sup>1,2</sup>, 张 岩<sup>2</sup>, 赵 青<sup>1</sup>, 黄小平<sup>1</sup>, 郭 成<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学 资源与环境学院, 成都 611731; 2. 上海空间推进研究所  
上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

**摘 要:** 为了在高超声速飞行器减阻中达到更好的减阻效果, 设计了一种电弧射流等离子体激励器。采用有限元法求解非线性多物理方程, 对此电弧射流等离子体激励器的工作特性进行了数值模拟, 得到了激励器内部的电势、压力、温度和速度分布, 综合分析了进气口气体速度、放电电流、激励器管道半径对电势、压力、温度和速度分布的影响。获得了全面的影响规律, 通过仿真结果还得到: 电弧射流等离子体激励器可产生最高温度为 8638 K、最高速度为 655 m/s 的等离子体射流。当电流 20 A, 进气速度 0.5 m/s, 管道半径 2.5 mm 时, 所需功率最小; 当电流 20 A, 入口气体流速 5 m/s, 管道半径 2.5 mm 时, 出口处平均温度最高; 当电流 20 A, 进口气体速度 10 m/s, 管道半径 2.5 mm 时, 出口处平均速度最大。并对仿真得到的放电电压进行了实验验证, 在等离子体参数相似的情况下, 实验结果与仿真结果吻合较好。

**关键词:** 减阻激励器; 等离子体; 电弧放电; 数值模拟; 等离子体炬

中图分类号: V224<sup>4</sup>

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210527

## Numerical study on the characteristics of an arc jet plasma actuator

Yuan Ye<sup>1,2</sup>, Zhang Yan<sup>2</sup>, Zhao Qing<sup>1</sup>, Huang Xiaoping<sup>1</sup>, Guo Cheng<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** An arc jet plasma actuator was designed for drag reduction of hypersonic vehicle to achieve better drag reduction effect. The characteristics of the arc jet plasma actuator were simulated numerically by using the finite element method to solve the nonlinear multiple physical equations, and the distributions of potential, pressure, temperature and velocity inside the actuator were obtained, and the influencing effects of velocity at the inlet, current, radius of the pipe on the distributions of potential, pressure, temperature and velocity were analyzed comprehensively. The comprehensive influence laws are obtained, and the simulation shows that the arc jet plasma actuator can produce a plasma jet with a maximum temperature of 8638 K and a maximum velocity of 655 m/s. The minimum power is required when the inlet gas velocity is the least, the maximum average temperature at the exit is obtained when the plasma current is the largest and the inlet gas velocity is medium. The maximum average speed at the exit is obtained at the largest current and the largest inlet gas velocity. Validation by experiment is also carried out. Comparison between the experimental and simulation results also show good agreement under similar plasma parameters.

**Key words:** drag reduction actuator, plasma, arc discharge, numerical simulation, plasma torch

电弧等离子体具有高温、能量集中、反应气体可变的特点, 使得电弧等离子体炬的应用迅速发展。电弧等离子体炬可用于切割、焊接、喷涂、垃圾处理、电厂燃煤、等离子点火、医药卫生等领域<sup>[1-5]</sup>。因此, 电弧等离子体炬已成为研究的热点, 来自世界各地的研究人员在这一领域做了很多工作<sup>[6-10]</sup>。

Huang Heji 等观察了直流非转移等离子体炬阳极表面的弧根运动, 加入氢使 Ar-H<sub>2</sub> 等离子体的弧根附着由扩散型向收缩型转变, 弧根突然不规则地从一个点跳跃到另一个点, 由高速摄像机拍摄的弧根运动的图像呈现在文献 [11]

\* 收稿日期: 2021-11-26; 修订日期: 2022-02-26

基金项目: 上海市科学技术委员会资助项目(17DZ2280800)

联系方式: 袁 野, 494050711@qq.com。

通信作者: 赵 青, zhaq@uestc.edu.cn。

中。Alexandre Lebouvier 等人提出了在非常特殊的高压低电流条件下与空气一起工作的直流等离子体炬的 MHD 模型,从温度、速度、电势、焦耳热和弧根运动等方面研究了电流和空气流量对电弧特性的影响<sup>[12]</sup>。Liang Peng 等人通过开发的一个简化的一维鞘层模型来实现等离子体与电极区耦合,其中考虑了阴极上特殊的空间电荷层(鞘层),然后将该模型应用于未传输的直流等离子体炬,以研究等离子体与电极之间的热力学和电磁相互作用,给出了电极区和等离子体区的模拟结果,鞘层模型预测的电势时间演化与实验测量结果吻合良好<sup>[13]</sup>。动态等离子体的行为由磁流体力学(MHD)方程控制,有效解仍然是计算电磁学中一个具有挑战性的开放问题, Xu Xiaowen 等人提出了一种求解 MHD 方程的方法,并将其应用于原型等离子弧焊炬的求解,此外,还引入了多段电弧模型来预测初始电流密度分布<sup>[14]</sup>。孙江红等人考虑两组化学反应模型,采用双温化学非平衡模型研究了氩直流电弧等离子体炬的等离子体特性,通过与实验测量的温度和电弧电压的比较可以推断,适当的化学动力学模型对于准确捕捉等离子体炬中的等离子体特性非常重要<sup>[15]</sup>。

对电弧等离子体炬已经有了广泛的研究,但针对不同的应用需求,设计的电弧激励器结构不完全相同,因而性能的参数影响规律需要个别分析,且以前的电弧激励器特性的影响因素分析还不够全面。本文旨在全面地讨论我们设计的这种电弧激励器的工作特性对参数的依赖关系和变化规律。

## 1 物理模型和方程

电弧射流等离子体激励器结构如图 1 所示,并建立了等离子体激励器内部多场耦合模型。假设电弧等离子体为局部热力学平衡状态,电子和重离子温度相等,不考虑重力。电弧等离子体在光学上被看作一薄层,不考虑电弧对辐射的吸收,运用净发射系数计算辐射损失,气体被假设为弱可压缩。

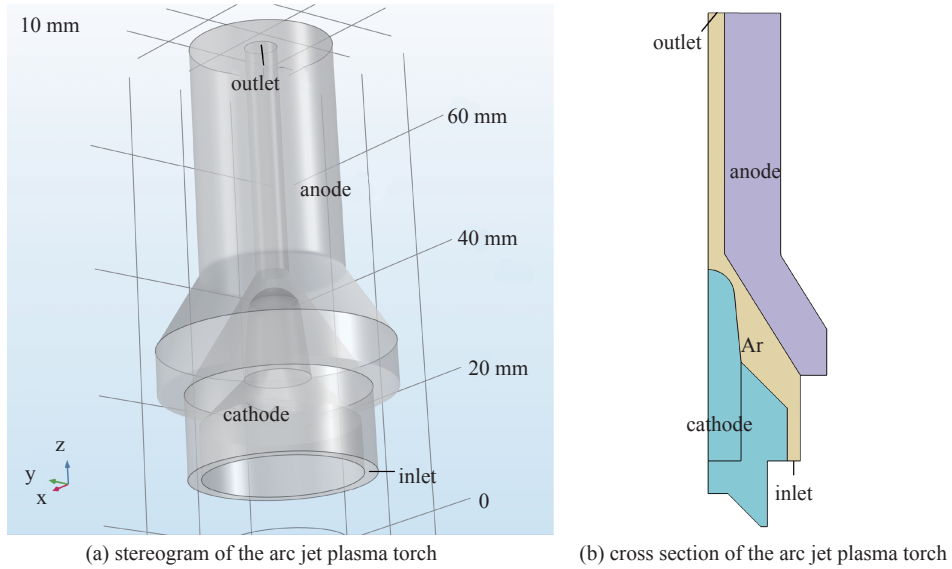


Fig. 1 Structure diagram of arc jet plasma actuator

图 1 电弧射流等离子体激励器结构图

对于层流和弱可压缩氩气流,质量连续方程、动量 Navier-Stokes 方程和能量方程分别为<sup>[16]</sup>

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

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

$$\rho c_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3)$$

式中:  $\rho$ 和 $\eta$ 分别是流体的密度和动力粘度;  $\mathbf{u}$ 是流体速度;  $p$ 是压强;  $\mathbf{I}$ 是单位张量;  $\mathbf{F}$ 是体积力,包括洛伦兹力 $\mathbf{F}_L$ ;  $T$ ,  $k$ ,  $c_p$ 和 $Q$ 分别是温度、热导率、定压比热容和热源,其中 $Q$ 包括焦耳热项 $Q_J$ 、电子焓输运项及由净体积发射系数计算的体积净辐射损失项,  $F_L$ 和 $Q_J$ 分别为

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (4)$$

$$Q_J = \mathbf{J} \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (5)$$

式中： $\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})$ 是电流密度， $\mathbf{E} = -\nabla V$ 为电场强度， $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 为磁感应强度， $V$ 为电势， $\mathbf{A}$ 为磁矢量， $\sigma$ 为电导率。

电弧射流等离子体激励器模型为二维轴对称，其结构如图1(b)所示。氩气是工作气体，阳极材料为铜，阴极材料为铜和钨。设置阴极尖端法向电流密度，阳极接地。阳极、阴极分别接水冷，即加入对流热通量边界条件 $q = h \cdot (T_{\text{ext}} - T)$ ，其中 $h$ 为传热系数， $T_{\text{ext}}$ 为外部温度。进气口设置速度。求解区域一共有 $5.8 \times 10^3$ 个三角形单元，求解自由度数为 $6.9 \times 10^5$ 。选择全耦合方法，选择MUMPS直接求解器对模型方程进行数值积分，同时，对电导率最小值采用参数化扫描，来改善计算的收敛性。采用多物理场耦合方法进行建模仿真，电流模块求解电势 $V$ ，磁场模块求解磁矢量 $\mathbf{A}$ ，流体传热模块求解温度 $T$ ，层流模块求解速度 $\mathbf{u}$ 和压强 $p$ ，这几个模块通过设置多物理场耦合在一起。求解(1)式至(10)式可得激励器内部的电势 $V$ 、压力 $p$ 、温度 $T$ 和速度 $\mathbf{u}$ 等参数的分布情况，在下面影响因素研究里将进行详细分析。

## 2 结果与讨论

图2为电流20 A、气体入口速度10 m/s、管道半径2.5 mm时的电势、压力、温度、速度分布图。阳极的电位接近0 V，在阴极尖端发射电流的电位最低，气体出口压力约为0，压力最大值在下腔获得，最小温度为300 K，最大温度在高温等离子体中。由于增加了水冷却，阳极和阴极的温度相对较低，可以有效地防止阳极和阴极被高温融化和适应长时间稳定电弧放电的需要。在阴极尖端，电流密度最高，大量的氩原子被分解并电离，形成电流通路，产生从阳极到阴极的电压降，气体击穿首先发生在距离阳极到阴极最近的地方，形成电弧放电等离子体。放电产生的焦耳热引起气体瞬间的极度膨胀，在电弧管道形状和进口速度的共同作用下，等离子体从出口高速喷射出来，沿轴方向向上电位有从最小到最大的趋势，从阴极到上部温度最大值处，温度逐渐升高，不会立即在阴极达到最大值，这是因为吹入的低温气体降低了电弧温度，温度不能达到最大值。在气体从最高温度到出口的运动过程中，在压力的作用下运动速度增大，气体的内能转化为气体运动的动能，所以气体的温度逐渐降低。最大速度是在出口处获得的。

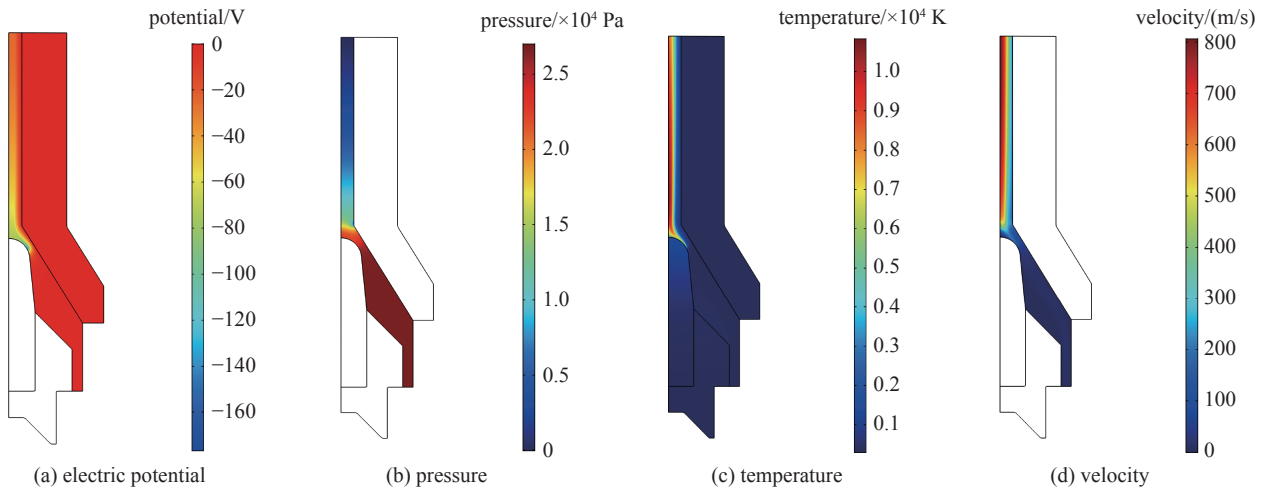


Fig. 2 Plasma characteristic distribution at current 20 A, gas inlet velocity 10 m/s and pipe radius 2.5 mm

图2 电流20 A、气体入口速度10 m/s、管道半径2.5 mm时的等离子体特性分布图

为了更清楚地看到不同情况下电势分布图的差异，取了两条截线，即取 $z=40$  mm、 $r=0$ 至出口半径的一条径向线段，和 $r=0$ 、 $z$ 在34~72.9 mm范围内的一条轴向线段为研究对象( $r$ 为径向坐标， $z$ 为轴向坐标)。

### 2.1 电势分布及影响因素分析

电流、气体入口速度和管道半径对径向和轴向电位分布的影响如图3所示。从图3(a)可以看出，在管道一定半径范围内，电势几乎不变，即绝对值最大的负值，当大于这个半径时，电势逐渐上升到零。这是因为在半径内部一定范围内，几乎没有径向电流，而电流几乎都是轴向的，这个半径称为弧柱半径，径向电流发生在此半径以外，径向电流接触管壁的地方称为弧根。随着进口速度的增加，弧柱的电势绝对值增大，这是因为电弧体被气流拉得更长，在电导率变化不大的情况下，增加电阻的长度意味着增加电阻值，电流在当前情况下变化不大，两端的电压值会大大增加。此外，弧柱半径变小，这是由于进口的低温气体对高温弧柱的冷却和压缩作用，气体入口速度越高，气流速度越快，压缩效果越强。随着速度的增加，电势绝对值的增量减小，弧柱半径的减小量减小。这是因为

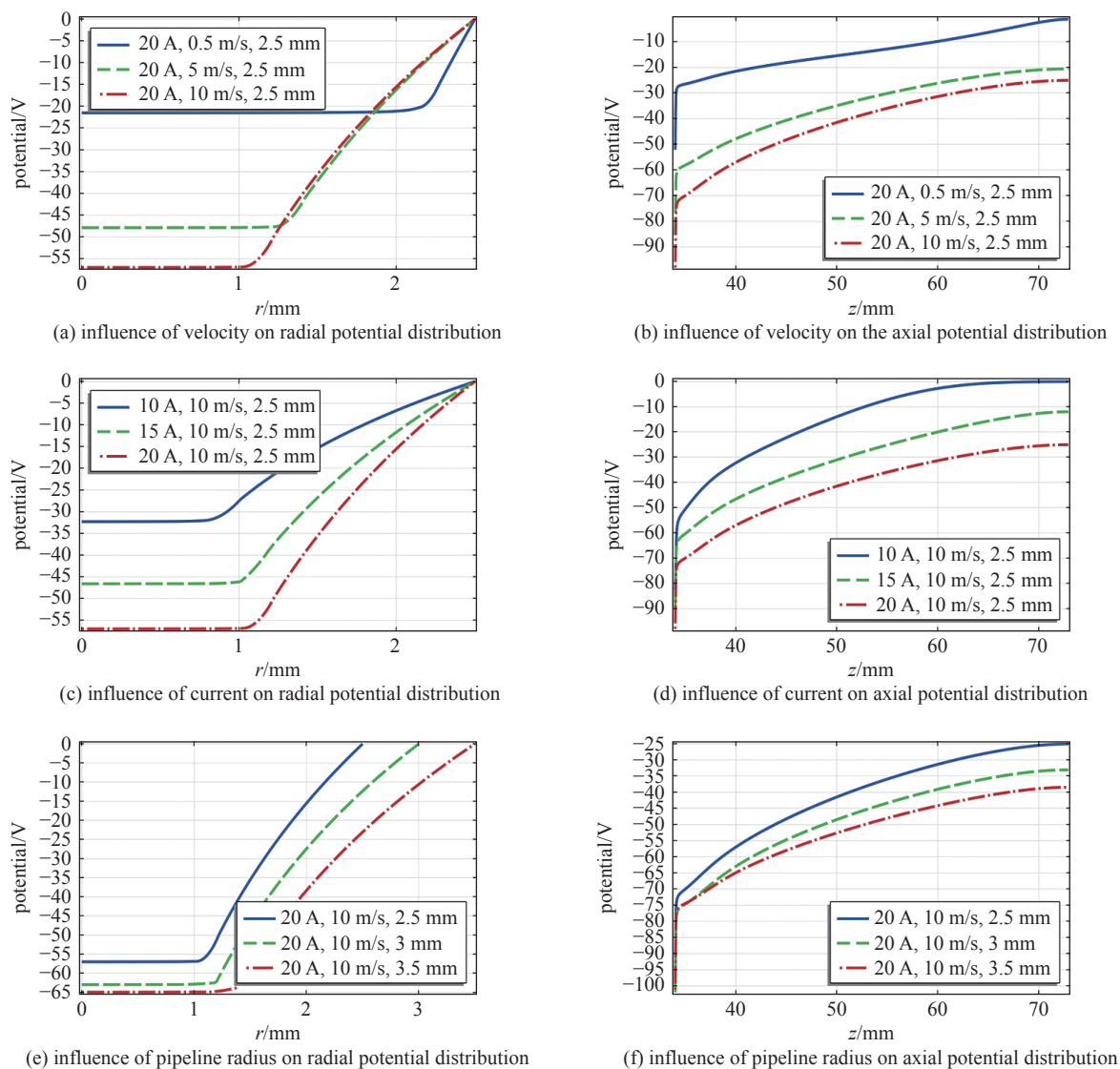


Fig. 3 Influences of current, gas inlet velocity and pipe radius on radial and axial potential distribution

图 3 电流、气体入口速度和管道半径对径向和轴向电位分布的影响

弧根离出口越近, 弧体的增长部分离进口越远, 受气流的影响越小, 气流进一步拉伸它就越困难。由于  $r$  越小, 温度越高, 弧柱半径减小, 等离子体越靠近中心, 等离子体温度越高, 冷气体对等离子体的冷却越困难, 所以弧柱半径的减小量变小。从图 3(c) 可以看出, 随着电流的增大, 电势绝对值总体增大, 这是由于随着电流的增大, 电弧产生的焦耳热增大, 管道内温度增大。电导率随温度变化, 随着温度升高, 电导率增加, 这样电阻就减小了, 而电流增大的影响大于电阻减小的影响, 所以电势绝对值增大。且随着电流的增加, 电势绝对值的增量减小, 这是因为如果电阻不变, 电流等差地增大, 则电势绝对值增大量不变, 而此时电流等差增大, 电阻减小, 所以电位绝对值增大量减小。电弧柱半径随电流的增大而增大, 弧柱半径增大量随电流的增大而减小。这是因为焦耳热越大, 弧柱的高温范围就越大, 而弧柱半径受通道壁的限制, 弧柱半径越靠近通道壁, 影响越明显。从图 3(e) 可以看出, 随着管道半径的增大, 电势的绝对值增大, 而弧柱电势绝对值增大量减小。这是因为当管道半径增大时, 阳极与阴极之间的距离变长, 电弧变长, 电导率变化不大, 电阻变大, 电势的绝对值增大。增大量减小是由于进气速度不变时, 随管道加宽, 冷气体对电弧的压缩作用减小, 弧柱会加宽, 有使弧柱电阻减小的趋势, 抵消部分前面的电阻变大作用, 所以弧柱电势绝对值增大量减小。

## 2.2 压力分布及影响因素分析

电流、气体入口速度和管道半径对径向和轴向压力分布的影响如图 4 所示。从图 4(a) 可以看出, 压力在径向几乎不变, 随着进气口速度的增大, 压力增大, 压力增大量微弱减小。这是因为, 压力由热膨胀和入口速度产生, 电流不变, 焦耳热变化不大, 入口速度越大, 右下方腔室里压力就越大。增大量减小是因为随入口速度增大, 管道

内对流换热加剧,管内气体温度降低,有降低管内压力的趋势,因此管内压力随气流速度增大不是等比例增大,而是增大量有所减小。从图4(c)可以看出,随着电流的增大,压力增大,压力增大量增大。这是因为焦耳热变大,热膨胀产生的压力增大。增大量增大是因为,随电流增大,温度升高,气体电离度增大,压力增大加速。从图4(e)可以看出,随着管道半径的增大,压力减小,压力减小量减小。这是由于管道空间整体变大,压强变小。从图5(e)可以看出,减小量减小的原因是,在大部分区域,随半径增大,温度升高,温度升高有使压力增大的作用,抵消部分压力减小量,使减小量减小。

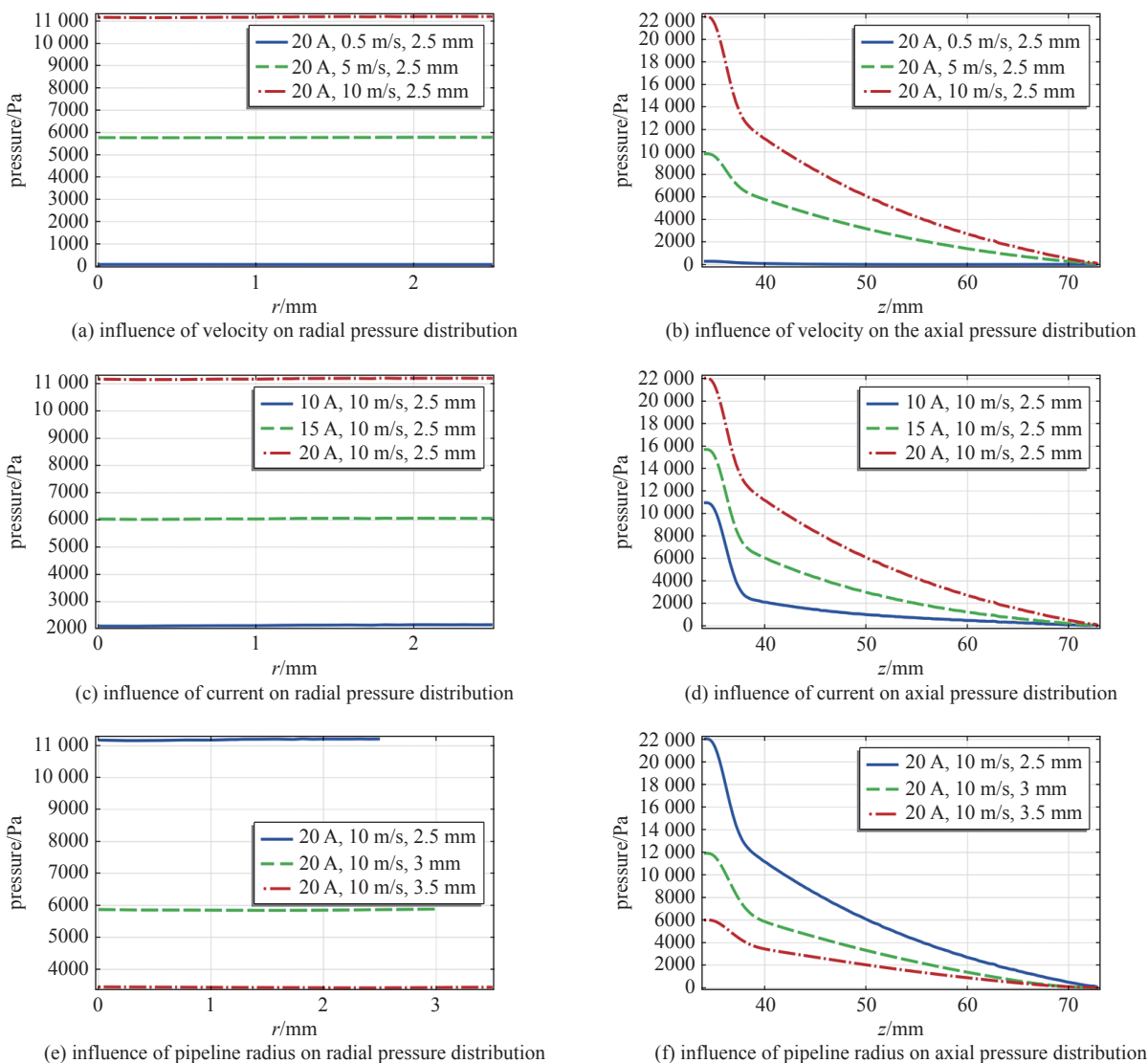


Fig. 4 Influences of current, inlet velocity and pipe radius on radial and axial pressure distribution

图4 电流、进气速度和管道半径对径向和轴向压力分布的影响

### 2.3 温度分布及影响因素分析

电流、气体入口速度和管道半径对径向和轴向温度分布的影响如图5所示。由图5(a)可以看出,温度在径向减小,速度为0.5 m/s时, $z=40$  mm处的径向温度分布为一条开始平缓下降后来下降曲线越来越陡峭的曲线,速度为5 m/s和10 m/s时, $z=40$  mm处的径向温度分布为一条先平缓下降后陡峭下降再平缓下降的曲线。速度0.5 m/s的曲线在 $r$ 比较小时的温度小于速度5 m/s和10 m/s的曲线的温度值,在 $r$ 较大时,速度0.5 m/s的曲线的温度大于速度5 m/s和10 m/s的曲线的温度值。速度5 m/s的温度值在 $r$ 较小时和10 m/s的曲线的温度值相等,在 $r$ 较大时比10 m/s时曲线的温度大。这是因为,温度在中心弧柱区较高,在弧柱区外,随着冷气流的加入,温度降低,所以温度的径向分布呈下降趋势。在 $r$ 较小区域,速度0.5 m/s时 $z=40$  mm处于中心电弧的上方,而速度5 m/s和10 m/s时随气流作用中心电弧上移, $z=40$  mm处的温度0.5 m/s时小于5 m/s和10 m/s时。在 $r$ 较大时,随速度增大,冷气对电弧冷却压缩作用加强,所以在弧柱外部温度减小。在图5(a)中,随速度增大,温度更趋于分布梯度变化更大,高温区更集

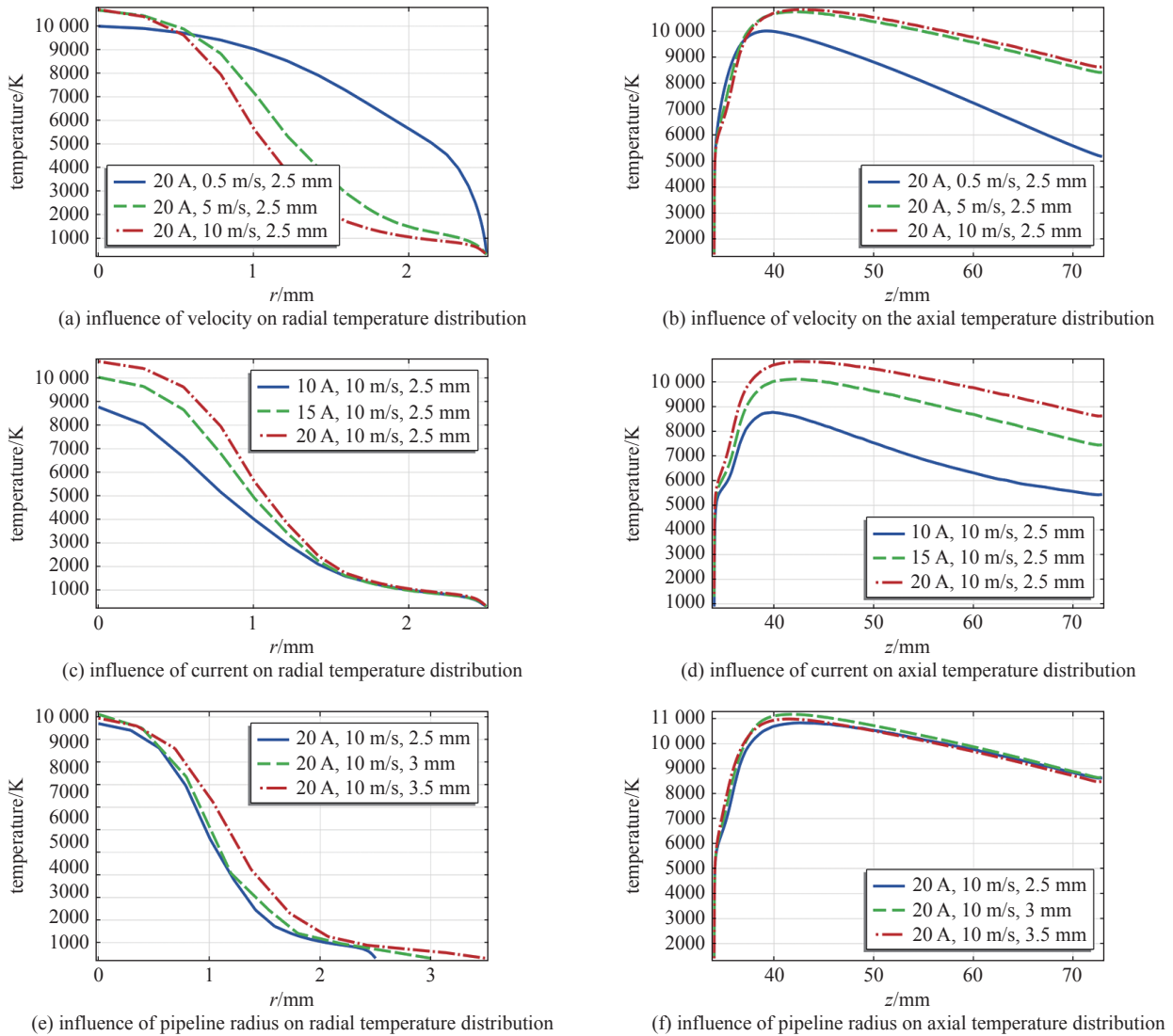


图 5 电流、进气速度和管道半径对径向和轴向温度分布的影响

图 5 电流、进气速度和管道半径对径向和轴向温度分布的影响

中, 面积更小, 低温区更大, 温度在大部分区域更低, 这是因为, 速度的增大, 使动能增大, 热能减小, 温度降低。从图 5(c) 可以看出, 随着电流的增大, 温度增大, 这是因为电流产生的焦耳热变大, 温度增大。且温度增大量是减少的, 是由于随电流增大, 温度升高, 但同时导热系数也增大, 传导走的热量增大, 因此热量减小量增大, 所以温度的增大量是减小的。从图 5(e) 可以看出, 随着管道半径的增大, 温度在径向增大; 在轴向远离出口处, 随半径增大温度增大, 在轴向临近出口处, 随半径增大温度减小。这是因为, 影响温度的有两个因素: (1) 阳极温度比较低, 管道半径增大后, 离阳极距离变远, 使气体温度升高; (2) 把整个等离子体看成一个电阻, 电阻阻值变化规律复杂。这两个因素同时作用, 造成这个结果。

#### 2.4 速度分布及影响因素分析

电流、气体入口速度和管道半径对径向和轴向速度分布的影响如图 6 所示。从图 6(a) 可以看出, 随着进气口速度的增大, 速度增大, 这是因为, 速度由热膨胀和入口速度共同作用产生, 电流不变, 焦耳热变化不大, 入口速度越大, 速度就越大。从图 6(c) 可以看出, 随着电流的增大, 速度增大, 这是因为焦耳热变大, 热膨胀产生的速度增大。从图 6(e) 可以看出, 随着管道半径的增大, 速度减小, 这是由于管道空间整体变大, 压强变小, 压力产生的速度变小。

#### 2.5 关键性能参数分析

表 1 为电弧等离子体激励器的关键性能参数, 列出了内部最小电压来估计放电功率, 而出口平均温度和速度是等离子体射流性能的重要指标。从表中可以看出, 在电流 20 A, 进气速度 0.5 m/s, 管道半径 2.5 mm 时, 需要的功率最小。电流 20 A, 入口气体流速 5 m/s, 管道半径 2.5 mm 时, 出口处平均温度为最大。电流 20 A, 入口气体速度

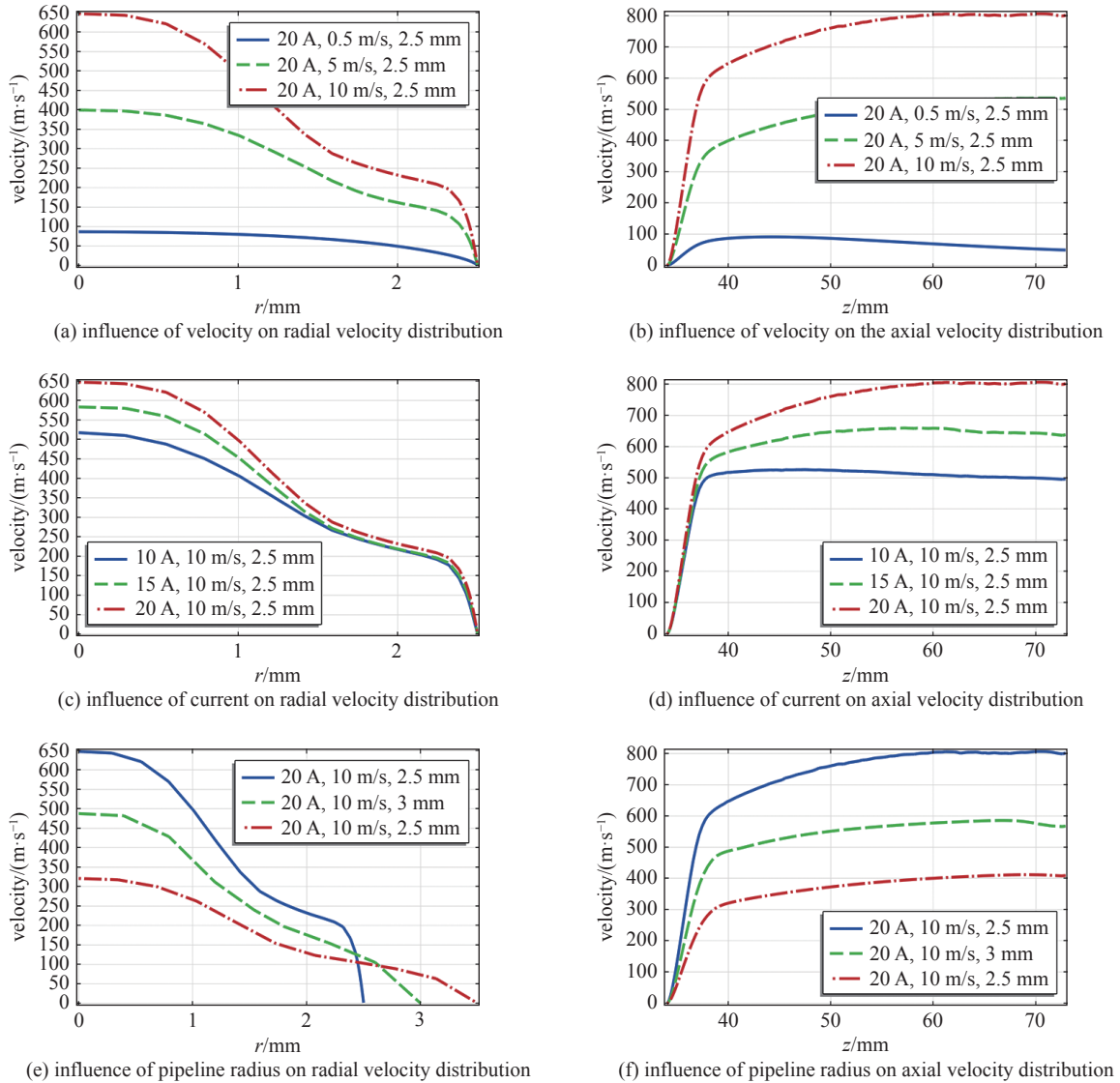


Fig. 6 Influences of current, inlet velocity and pipe radius on radial and axial velocity distribution

图 6 电流、进气速度和管道半径对径向和轴向速度分布的影响

表 1 电弧射流等离子体激励器的关键性能参数

Table 1 Key performance parameters of arc jet plasma actuator

current/ A	inlet gas velocity/(m/s)	pipe radius/ mm	internal minimum voltage/V	average temperature at the exit/K	average speed at exit/(m/s)
20	0.5	2.5	-83.7	3035.9	26.8
20	5.0	2.5	-145.2	3994.3	308.5
20	10.0	2.5	-176.8	3185.9	424.6
10	10.0	2.5	-171.7	1963.3	275.4
15	10.0	2.5	-177.2	2565.7	340.1
20	10.0	3.0	-168.0	3035.7	281.9
20	10.0	3.5	-157.8	2982.5	199.9

10 m/s, 管道半径 2.5 mm 时出口处平均速度为最大。当进气流速最小时, 需要最小的功率; 当电流最大且入口气体速度中等时, 出口平均温度最高; 当电流最大且进口气体速度最大时, 出口处的平均速度最大。

## 2.6 实验验证

为了与仿真结果对照, 我们加工出了电弧射流等离子体激励器实物, 做出的实物取管道半径 2.5 mm, 其余结构尺寸见图 1, 图 7(a) 为拍摄的电弧射流等离子体激励器实物。实验设置如下: 工作气体为高纯氩气, 实验参考压力为

101325 Pa, 进口流量和稳定放电时的等离子体电流如表2所示, 等离子体射流图如图7(b)所示。

我们测量了一组工况下的实际电流和电压值, 得到的测量数据如表2所示。表中, 入口流量 5 L/min 相当于 0.5 m/s 的入口速度。从表2可以看出, 在入口速度 0.5 m/s、电流 20A 时, 实验得到稳定放电电压为 84~88 V。从图8可以看出, 在入口速度 0.5 m/s、电流 20 A 时, 仿真得到最小电势约为-83 V, 即电弧稳定放电电压约为 83 V。实验结果与仿真结果吻合。



Fig. 7 Experimental photos of arc jet plasma actuator

图7 电弧射流等离子体激励器实验拍摄图

表2 实测电流电压特性表

Table 2 Measured current and voltage characteristics

inlet flow/ (L·min <sup>-1</sup> )	preset current before discharge/A	stable discharge current/A	preset voltage before discharge/V	stable discharge voltage/V
5	7	20	493	84
7	7	21	493	130
5	8	20.2	493	86
5	8.5	21.4	493	88
5	9	21.5	493	86.7
5	9	20	494	88
5	10	21.5	494	84
5	11	22	494	80

### 3 结 论

本文设计了一种用于流动控制的电弧射流等离子体激励器。得到了不同工况下激励内部电位、压力、温度和速度的分布情况, 并对影响因素进行了综合分析, 得到了进口速度、电流和管道半径对电势、压力、温度和速度分布的全面影响规律: (1)随着进口速度的增加, 弧柱的电势绝对值增大, 电势绝对值的增量减小, 弧柱半径减小, 弧柱半径的减小量减小。随着电流增大, 电势绝对值增大, 电势绝对值的增量减小。随电流增大, 弧柱半径增大, 弧柱半径增大量减小。随着管道半径的增大, 电势绝对值增大, 而弧柱电势绝对值的增量减小; (2)随着进口速度的增加, 压力增大, 压力增量略有减小。随着电流的增加, 压力增大, 压力的增量增大。随着管道半径的增大, 压力减小, 压力减小量减小; (3)随着速度的增加, 温度分布趋于有更大的梯度, 高温区更集中, 面积更小, 低温区面积更大, 在大部分区域温度更低。温度随电流的增加而增加, 温度增量减小。随着管道半径的增加, 温度也随之增加; (4)随着进口速度的增加, 速度增大。速度随电流的增加而增加。随着管道半径的增大, 速度减小。

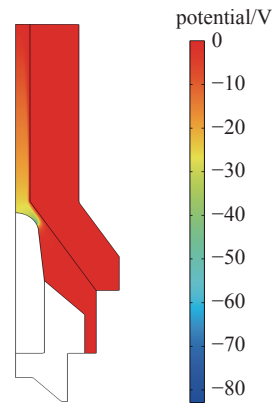


Fig. 8 Potential distribution at current 20 A, gas inlet velocity 0.5 m / s and pipe radius 2.5 mm

图8 电流 20 A、气体入口速度 0.5 m/s、管道半径 2.5 mm 时的电势分布图



通过比较不同工况下激励器的关键性能参数,可知:在电流 20 A,进气速度 0.5 m/s,管道半径 2.5 mm 时,稳定放电需要的功率最小。电流 20 A,入口气体流速 5 m/s,管道半径 2.5 mm 时,出口处平均温度为最大。电流 20 A,进口气体速度 10 m/s,管道半径 2.5 mm 时出口处平均速度为最大。并对仿真结果进行了实验验证,实验结果与仿真结果吻合较好。

#### 参考文献:

- [1] Dorier J L, Gindrat M, Hollenstein C, et al. Time-resolved imaging of anodic arc root behavior during fluctuations of a DC plasma spraying torch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2001, 29(3): 494-501.
- [2] Ghorui S, Sahasrabudhe S N, Murthy P S S, et al. A dc arc plasma torch as a tailored heat source for thermohydraulic simulation of proton beam-target interaction in ADSS[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2006, 15(4): 689-694.
- [3] Bhuyan P J, Goswami K S. Two-dimensional and three-dimensional simulation of DC plasma torches[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, 35(6): 1781-1786.
- [4] Kavka T, Matějček J, Ctibor P, et al. Plasma spraying of copper by hybrid water-gas DC arc plasma torch[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, 20(4): 760-774.
- [5] Zhao Yizhe, Su Yilin, Hou Xuyan, et al. Directional sliding of water: biomimetic snake scale surfaces[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4: 210008.
- [6] Bubljevsky A F, Gorbunov A V, Marquesi A R, et al. Generalization of the total current-voltage characteristics for transferred arc plasma torch with steam and air plasmas based on the analytical anisotropic model[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(10): 3707-3715.
- [7] Mavier F, Rat V, Coudert J F. Influence of time-modulation of applied current on arc stability in DC pulsed plasma spray torch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(4): 565-573.
- [8] Ondac P, Maslani A, Hrabovsky M, et al. Measurement of anode arc attachment movement in DC arc plasma torch at atmospheric pressure[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2018, 38(3): 637-654.
- [9] Sun Qiang, Liu Yonghong, Han Yancong, et al. A novel experimental method of investigating anode-arc-root behaviors in a DC non-transferred arc plasma torch[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, 29: 025008.
- [10] Pan Zihan, Ye Lei, Qian Shulou, et al. Comparison of Reynolds average Navier-Stokes turbulence models in numerical simulations of the DC arc plasma torch[J]. *Plasma Science and Technology*, 2020, 22: 025401.
- [11] Huang Heji, Pan Wenxia, Wu Chengkang. Arc root motion in an argon-hydrogen DC plasma torch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(4): 1050-1051.
- [12] Lebouvier A, Delalondre C, Fresnet F, et al. Three-dimensional unsteady MHD modeling of a low-current high-voltage nontransferred DC plasma torch operating with air[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(9): 1889-1899.
- [13] Liang Peng, Groll R. Numerical study of plasma-electrode interaction during arc discharge in a DC plasma torch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(2): 363-372.
- [14] Xu Xiaowen, Yang Shiyong, Zhou Qiang, et al. A 2-D axisymmetric magneto-hydrodynamic model of a DC arc plasma torch and its solution methodology[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, 56: 7503904.
- [15] Sun Jianghong, Sun Surong, Zhang Lihui, et al. Two-temperature chemical non-equilibrium modeling of argon DC arc plasma torch[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2020, 40(6): 1383-1400.
- [16] Chinè B. A 2D model of a plasma torch[C]//Excerpt from the Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Munich. 2016.