直流电弧等离子体炬的数值模拟研究

陈文波[1,2], 陈伦江[1], 刘川东[1], 程昌明[1], 童洪辉[1], 朱海龙[3]

(1.核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041; 2.南华大学电气工程学院, 湖南 衡阳 421001;
3.山西大学物理电子工程学院, 山西 太源 030006)

摘 要: 本文建立了直流电弧热等离子体炬的三维模型, 利用流体动力学软件 FLUENT 对氮气热等离子体温度及速度的空间分布进行了数值模拟, 并在此基础上研究了工作气体流量的变化对炬内热等离子体传热与流动特性的影响效应。研究结果表明: 等离子体温度的最高值出现在阴极附近, 并随着轴向距离的增加而减小; 等离子体速度则随着轴向距离的增加而增加, 在炬出口处达到其速度的极大值; 工作气流量的增加对炬内的温度分布影响不大, 但等离子体温度呈现出随工作气流量的增加而减小的趋势。

关 键 词: 数值计算; 热等离子体; 流动特性; 传热特性
中图分类号: TB126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-0322(2019)01-0056-03
doi: 10.13385/j.cnki.vacuum.2019.01.12

Numerical simulation of a DC arc thermal plasma torch

CHEN Wen-bo[1,2], CHEN Lun-jiang[1], Liu Chuan-dong[1], CHENG Chang-ming[1], TONG Hong-hui[1], ZHU Hai-long[3]

(*1.Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China;*
2.College of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;
3.College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In this paper, a three dimensional model of DC arc thermal plasma torch was established. The CFD software FLUENT was then used to simulate the spatial distribution of temperature and velocity for nitrogen thermal plasma, and the influence of the working gas flow on the spatial distribution of temperature were studied base on the model. The results show that the highest plasma temperature occurs near the cathode and decreases with increasing the axial distance, while the situations will reverse for plasma velocity and it reaches the maximum at the torch exit. There was no significant effect on the spatial distribution of plasma temperature by increasing the working gas flow rate, while the plasma temperature tends to decrease as increasing the working gas flow rate.

Key words: Numerical simulation; thermal plasma; flow character; heat-transfer character

直流(DC)电弧热等离子体作为一种具备高温、高焓、以及高化学活性的理想热源。在热喷涂、超细粉末材料制备、危险废物处理、环境保护、化学化工等诸多领域[1]均有着广阔的应用前景, 因此备受国内外学者的关注。热等离子体射流的物理性质主要由等离子体炬内的温度场决定, 所以研究炬内温度空间的分布规律有着非常重要的意义。然而, 由于直流电弧等离子体炬的尺寸较小, 且炬内的温度较高, 采用实验测量的方法难以获得较为准确的数据。因此, 数值模拟就成为目前研究直流电弧等离子体炬最为有效的手段。澳大利亚的 Scott[2]及美国的 Szekely[3]等人率先开展了这方面的研究, 他们建立了直流电弧等离子体炬的模型, 并对炬内等离子体的温度及流场分布进行了求解。随后, 又有多个小组采用了数值模拟的方法对等离子体发生器内传热及流动特性进行了研究[4], 比如, Boulos 小组[5]对 DC 转移型电弧进行了研究, Hsu K C[6]等人研究了自由燃烧电弧等离子体。E Pfender 小组[7]以直流电弧等离子喷射法制取金刚石薄膜为背景对

收稿日期: 2018-03-30
作者简介: 陈文波(1983 年 -), 男, 湖南省衡阳市人, 博士生。
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(11535003, 11675074, 11805058); 湖南省教育厅项目(15C1174); 四川省青年科技创新研究团队专项计划(2016TD0015)

收缩—发散型阳极结构等离子体发生器的模拟；M. T. C. Fang[8]等人以等离子体高压电弧开关为背景对超音速等离子体电弧进行了数值模拟。核工业西南物理研究院的陈伦江等人[9]也利用fluent软件数值研究了一种具有双阳极结构的非转移型电弧等离子体的传热及流动特性等。以上研究小组为直流电弧等离子体的研究奠定了基础。然而，在实际应用中，由于所采用的等离子体炬尺寸不同，工作气流大小等操作参数也不尽相同。因此，对于不同的等离子体炬装置，上述研究成果尚不能直接运用到具体的实验操作过程中。

本文将利用基于有限体积法的商业软件 FLUENT 15.0 对一种直流电弧等离子体炬进行数值模拟，计算了等离子体炬内部氮气等离子体压强、温度及速度的空间分布，并在此基础上研究了工作气流量的变化对等离子体温度分布的影响。

1　数值模型

1.1　计算区域及基本假设

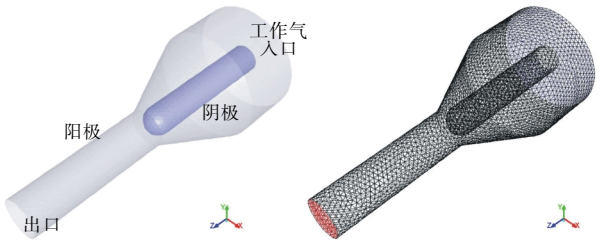

图 1　直流电弧等离子体炬装置几何结构图

Fig.1　Geometric structure of DC plasma torch structure

本文模拟的直流电弧等离子体炬几何结构及计算区域图 1 所示，为了进一步简化计算模型，还需要做以下假设：等离子体为光学薄，即可以认为辐射热损耗仅仅是温度的函数；炬内的热等离子体处于局域热力学平衡态，即电子温度与离子等重粒子的温度近似相等；等离子体为定常的、层流流动状态。

1.2　控制方程组

根据上一节的假设，控制方程组可以写为[10]：

质量守恒方程：$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\bar{v})=0$　　(1)

动量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\bar{v}\bar{v})=-\nabla p+\nabla\cdot\bar{\bar{\tau}}+F_L \quad (2)$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\bar{v}h)=-\nabla\cdot\left(\frac{\lambda}{c_p}\nabla h\right)+P_J-S_R \quad (3)$$

电流连续性方程：$\nabla\cdot(-\sigma\nabla\varphi)=0$　　(4)

$$\nabla^2\bar{A}=-\mu_0\bar{J},$$

电磁场方程：$\bar{B}=\nabla\times\bar{A}$，　　(5)

$$\bar{E}=-\nabla\varphi$$

洛仑兹力及焦耳热表达式：

$$\bar{F}_L=\bar{J}\times\bar{B},\ P_J=\bar{J}\cdot\bar{E} \quad (6)$$

上述方程中的所有物理量均为时间平均量。其中，$\bar{v}$ 为速度矢量，ρ，μ，λ 和 c_p 分别为等离子体密度，粘滞系数，热导率以及常压下的比热容，h 为等离子体焓值，p 为压力，S_R 为辐射热损耗；$\bar{J}=\sigma\bar{E}$ 为电流密度。

1.3　边界条件

为了求解上述方程并得到合理结果，还需合理的设置边界条件。模拟时采用的流场边界条件为：等离子体炬采用直送气方式进气，炬入口处的等离子体速度由工作气流量决定；炬出口处为压力出口；阴极、阳极表面及固定壁处均采用无滑移边界条件。温度场边界条件：阴极温度为 3000K；炬入口、出口以及阳极壁面处均设为 300K。电磁场边界条件：阴极表面电流密度 $J=I/\pi r^2$（该式中的 I 为等离子体弧电流，r 为阴极表面的半径），阳极电势 φ=0V，矢量磁位 A=0；喷枪入口、出口的电流密度、电势梯度和矢量磁位均为零。

2　结果与讨论

2.1　送粉气流量对等离子体温度分布的影响

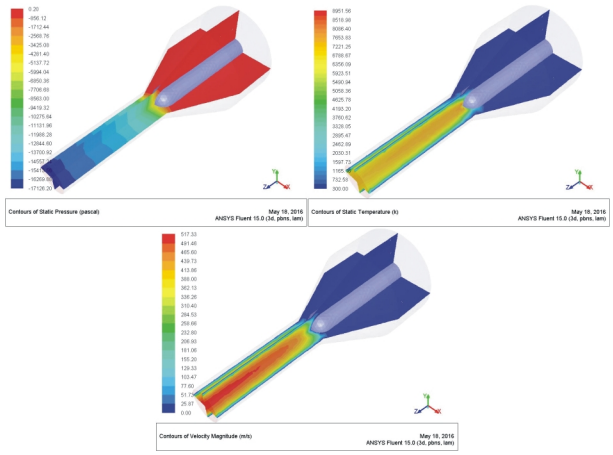

图 2　直流电弧等离子体炬内(a)压强、(b)温度及(c)速度分布的计算结果

Fig.2　Distribution of (a) pressure, (b) temperature and (c) velocityof DC arc plasma torch

根据第 2 小节所建立的数值模拟，对直流电弧等离子体进行三维数值模拟，得到等离子体炬内的压强、温度及速度空间分布的计算结果如图 2 所示。图 2 给出了工作气流量 Q_0 为 0.005kg/s，弧电流为 150A 时直流电弧等离子体炬内压强、

温度及速度空间分布的计算结果。由计算结果可以看出，当工作气流量为 0.005kg/s，弧电流为 150A 时，等离子体炬内部的最高温度（约为 8951.56K）出域主要集中于炬中轴线位置处，并沿轴向和径向逐步减小。等离子体的最大速度（约为 517.33m/s）则出现在炬出口中心位置处，而入口处与阴极表面处的等离子体速度非常小，这是因为在阴极表面处等离子体的温度最高，等离子体的密度最小，根据质量守恒定律，等离子体在该处的速度最小。

2.2 反应气流量对等离子体温度分布的影响

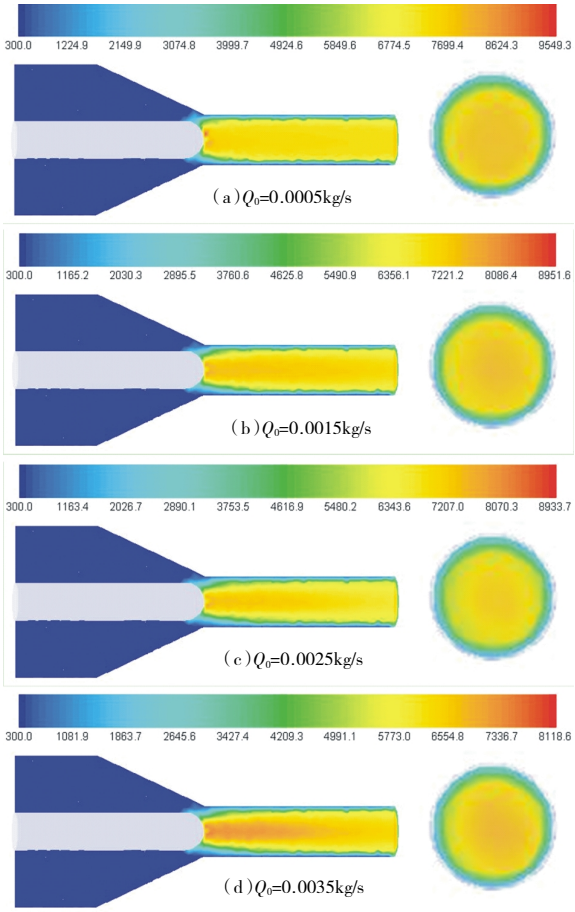

图 3 等离子体炬出口及剖切面处的温度分布随工作气流量变化的计算结果

Fig.3 Distribution of plasma temperature with different working gas flow rate at the outlet of the plasma torch and the cut plane

下面再来研究等离子体炬工作气流量的变化对等离子体炬空间内温度分布的影响。图 3 给出了弧电流固定为 150A，而工作气流量 Q_0 在 0.005~0.035kg/s 范围内变化时，炬内的等离子体温度沿出口处及剖切面分布的计算结果。从图中可以看出，随着工作气流量的增大，炬内的等离子体温度也略有减小，且高温区域逐渐集中于中轴线附近。这一现象主要是由于工作气流量的增加所产生的冷却效应导致的。

4 结论

本文对直流电弧等离子体的传热及流动特性进行了数值模拟，并分析研究了工作气体流量对炬内等离子体温度空间分布所产生的影响，得到的主要结论如下：

（1）当弧电流为 150A 时，氮气等离子体的最高温度可达 8000K 以上，出现在阴极弧根附近；等离子体速度的最大值则出现在炬出口的中心位置处。

（2）等离子体炬内温度的空间分布受送工作气流量变化的影响较小，但总体呈现出随气流量的增加而略为减小的趋势，且高温区域逐渐向中轴线附近集中。

参考文献

[1] Boulos M I, Fauchais P and P fender E. Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications [M]. New York Plenum Press, 1994.

[2] Scott D A, Kovitya P, Haddad G N. Temperatures in the plume of a DC plasma torch [J]. Journal of Applied Physics, 1989, 66(11): 5232–5239.

[3] Westhoff R, Szekely J. A model of fluid, heat flow, and electromagnetic phenomena in a non–transferred arc plasma torch [J]. Journal of Applied Physics, 1991, 70 (7): 3455–3466.

[4] Deng J, Li Y J, Xu Y X, et al. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a DC non–transferred arc plasma torch operating under laminar and turbulent conditions[J]. Plasma Science and Technology, 2011,13(2): 201–207.

[5] Blais A, Proulx P, Boulos M I. Three–dimensional numerical modelling of a magnetically deflected DC transferred arc in argon[J]. J. Phys. D: Appl. Phys. 2003,36(5): 488–496.

[6] Hsu K C, Etemadi K, Pfender E. Study of the free–burning high–intensity argon arc [J]. J. Appl. Phys., 1983, 54(3): 1293–1301.

[7] Pfender E, Selvarajan V, Padmanabhan P V A et al. Effect of powder loading on the excitation temperature of a plasma jet in DC thermal plasma spray torch[J]. Current Applied Physics, 2007(7):186–192.

[8] Fang M T C, Szenteb R N, Goldmana T I D et al. Modification of electrode materials for plasma torches [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200:254–257.

[9] 陈伦江，唐德礼，程昌明等. 双阳极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.

[10] Zhou Q, Li H, Xu X, et al. Comparative study of turbulence models on highly constricted plasma cutting arc [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42 (1): 1–14.