

低压直流电弧等离子体传热与流动的数值模拟^{*}

闫星辰^{1,2}, 刘 敏^{1,2}, 徐国富¹, 文 魁^{1,2}, 何 翔^{1,2}, 杨 焜²

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 广州有色金属研究院 a. 新材料研究所, b. 现代材料表面工程技术国家工程实验室, 广州 510650)

摘 要: 根据低压等离子体喷涂所使用的 F4-VB 喷枪结构, 建立了三维稳态湍流模型, 采用 Fluent 软件对 10^4 Pa 低压条件下等离子体喷涂过程中等离子体的温度、速度和压强分布进行了模拟。结果表明: 阴极尖端附近的等离子体温度达到最高值 29 000 K, 随后温度降低。等离子体速度在喷枪内急速上升, 离开喷枪出口约 0.01 m 时达到最大值 6 100 m/s, 随后速度降低。等离子体在距离喷枪出口附近约 0.07 m 以内经历了膨胀和压缩过程, 等离子体的膨胀和压缩对速度和温度的变化有显著影响。

关键词: 低压等离子体喷涂; 三维稳态模型; 等离子体射流特性

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)05-0057-07

Numerical Simulation for Heat Transfer and Flow of Plasma in LPPS

YAN Xing-chen^{1,2}, LIU Min^{1,2}, XU Guo-fu¹, WEN Kui^{1,2}, HE Xiang^{1,2}, YANG Kun²

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083; 2a. Institute of New Material, 2b. National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510650)

Abstract: According to the structure of low pressure plasma spray gun F4-VB, a three-dimensional, and steady, turbulent model was established. Computational fluid dynamic software Fluent was adopted in this study. The research mainly involves the temperature, pressure and velocity distribution inside the argon plasma torch under the pressure of 10^4 Pa in the argon environment. The results show that the plasma temperature reaches the highest value near the tip of the cathode at 29 000 K and then the temperature drops gradually. The plasma velocity rises rapidly inside the torch, reaching the highest value of 6 100 m/s after leaving a distance of 0.01 m from the exit and then drops slowly. Within a distance of 0.07 m from the plasma gun exit, plasma undergoes significant expansion and compression that obviously affect the tendency of velocity and temperature.

Keywords: low pressure plasma spray; three-dimensional steady model; plasma jet properties

0 引 言

低压条件下热等离子体喷涂射流与大气条件下相比, 射流更长, 存在超音速状态, 且能够获得一种区别于典型的典型层状涂层^[1-2]。喷涂中等离子体射流的温度和速度分布对获得高质量

的涂层有至关重要的影响。由于喷枪内部等离子体的高温高速及空间狭窄, 所以很难用测量手段去诊断喷枪内等离子体温度、速度分布^[3-5]。计算机数值模拟具有很强的过程揭示能力、参数相互关系的分析能力、丰富的表达能力等, 此外计

收稿日期: 2015-03-30; **修回日期:** 2015-09-07; **基金项目:** * 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB625100); 国家自然科学基金(51301046)

通讯作者: 刘敏(1965—), 男(汉), 教授, 硕士; **研究方向:** 表面技术; **Tel:** (020) 3723 8108; **E-mail:** liumin_gz@163.net

网络出版日期: 2015-09-09 15:11; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150909.1511.006.html>

引文格式: 闫星辰, 刘敏, 徐国富, 等. 低压直流电弧等离子体传热与流动的数值模拟 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(5): 57-63. Yan X C, Liu M, Xu G F, et al. Numerical simulation for heat transfer and flow of plasma in LPPS [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(5): 57-63.

算数值模拟成本低且相对容易。因此,选择数值模拟来研究等离子体射流特性对研究等离子体传热与流动有着十分重要的意义^[6-8]。

近年来,等离子体射流特性的研究已有很大进展^[9-11]。Gonzalez J^[12]等模拟了经典二维和三维稳态模型下喷枪内等离子体的传热与流动,指出二维模型可以较好地模拟喷枪内轴向温度分布。Li H P^[13]建立二维稳态层流和湍流模型,得到了与试验接近的温度场和速度场。由于采用二维轴对称假设,模拟所得电压值高于实际工作值。Vautherin B^[14]等将喷枪内部与喷枪外部分开,研究了稳态二维超低压枪外等离子体射流特性。

模拟依据低压 F4-VB 喷枪的结构,结合 10^4 Pa 低压的实际工况,采用 Fluent 软件模拟了等离子体温度、速度和压强的分布,这对理解低压等离子体喷涂中所发生的等离子体传热与流动过程具有一定的帮助作用。

1 物理模型

1.1 基本假设

模拟的过程中,采用了以下基本假设:

(1) 等离子体满足连续性介质假设,处于局域热力学平衡,且具有可压缩性。

(2) 等离子体光学薄,重力作用对等离子体的影响可以忽略不计。

(3) 等离子体在流动过程中产生的感应电场 $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ 和静电场相比可以忽略不计,同时也忽略了磁场对等离子体的影响。

(4) 等离子体的物性参数(热力学参数和输运参数)为温度的函数,同时也考虑了压强对物性参数的影响。

(5) 不考虑环境气体对等离子体物性参数的影响,即环境气体与工作气体相同。

1.2 控制方程

根据以上假设,等离子体传热与流动的控制方程如下:

连续性方程:

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

动量方程:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu [\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{V} \mathbf{I}] \quad (3)$$

能量方程:

$$\nabla \cdot [\mathbf{V}(\rho e + P)] = \nabla [k_{eff} \nabla T + (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{V})] + S_H \quad (4)$$

电势方程组:

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (5)$$

$$\mathbf{Q}_j = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (6)$$

欧姆定律:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

式中: ρ 为等离子体气体密度 (kg/m^3), $\mathbf{V}$ 为速度矢量 (m/s), P 为压力 (Pa), μ 为动力粘度 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$), T 为温度 (K), ∇ 为拉普拉斯算子, Q_j 为焦耳热 (J), $\boldsymbol{\tau}$ 剪切应力张量, $\mathbf{I}$ 为单位张量, e 为内能 (J), k_{eff} 为热导率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), $\mathbf{J}$ 为电流密度 (A/m^2), $\mathbf{E}$ 为电场强度 (V/m), S_H 为源项, σ 为电导率 (S/m), Φ 为电势 (V)。

采用的湍流模型为 RSM 雷诺应力模型,该模型可以得到强旋流流动较好结果。

2 计算域与边界条件

2.1 计算域

计算域不仅包括喷枪内等离子体流动区域,而且还包括阴极和阳极固体区域以及等离子体进入周围环境部分区域,如图 1 所示。图 1(a)(b)分别为低压等离子体喷涂 F4-VB 喷枪结构图和计算网格示意图,其中图 1(a)中 A、B、C 和 D 点分别代表阴极的尖端点、收缩段与平直段的交点、平直段与扩张段的交点以及喷枪出口处,图 1(b)中右下角为喷枪部分网格局部放大图。对计算域进行网格划分时采用了混合网格技术,总网格数约为 140 万,节点数约 75 万。

2.2 工作条件和边界条件

F4-VB 喷枪在低压条件下功率 39 kW, Ar 的流量 65 L/min。喷枪以外的计算域采用压力出口边界条件,其他边界条件见表 1,其中入口压力 P_{in} 及入口速度 V_{in} 由工作气体流量 65 L/min 计算得出。阴阳极材料为钨与铜,阴阳极最外层温度边界条件设为 300 K,阴阳极热导率为: $K_w = 173 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $K_{cu} = 387.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[15-16]。

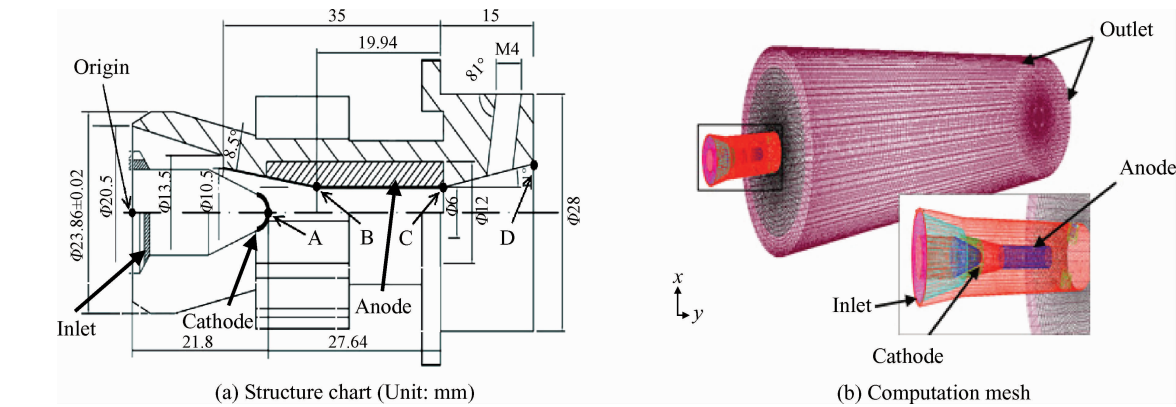


图 1 喷枪结构图和计算网格图

Fig. 1 F4 torch structure and computational mesh

表 1 F4 喷枪边界条件

Table 1 Boundary conditions of the F4 torch

Position	Temperature/K	Velocity/(m · s ⁻¹)	Pressure/Pa	Electrical potential/V
Inlet	300	V_{in}	P_{in}	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$
Outlet	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial V_i}{\partial n} = 0$	10^4	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$
Cathode-tip	Coupled			-60 (Variable)
Anode-straight	Coupled			0

耦合(Coupled)算法用于计算电极与等离子体相接处界面处的能量传递:

$$\nabla \cdot (K \cdot \nabla T) = h \cdot (T_p - T_w) \quad (8)$$

式中: K 为电极的电导率(W/(m · K)), h 为等离子体与电极的对流换热系数, T_p 为等离子体气体温度(K), T_w 为壁面温度(K)。

3 结果与分析

3.1 喷枪内等离子体温度与速度分布

图 2 描述了等离子体在喷枪内的分布情况,图 2(a)为沿喷枪轴向剖面的温度分布示意图,图 2(b)为沿喷枪轴向的温度变化曲线图。

从图 1 可以看出靠近阴极尖端(A 点)前方附近的等离子体温度达到最高值,约为 29 000 K。图 2(b)表明等离子体温度沿流动方向呈下降趋势,但不同位置下降的幅度略有差异。

图 2 中等离子体的温度在 A 点前方附近到达最大值,是由于阴极尖端电流密度和电场强度较大,故产生较大的焦耳热,有利于工作气体的加热和电离。随着等离子体朝喷嘴出口方向流动,轴向电流密度和电场强度逐渐减小,此时产生的焦耳热不断的减小。与此同时,电极壁面与等离子体之间的对流换热以及等离子体本身向周

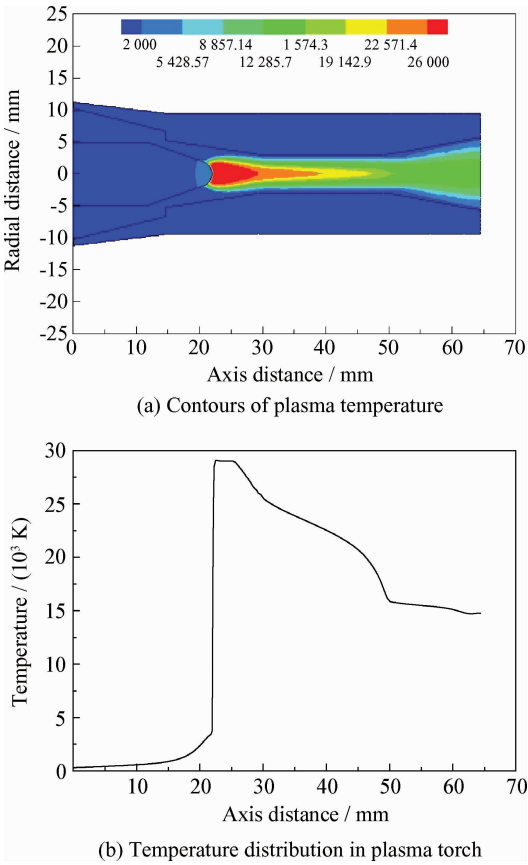


图 2 喷枪内温度云图及轴向温度分布

Fig. 2 Contours of plasma temperature and temperature distribution in plasma torch

围环境辐射能量,在三者的共同作用下等离子体温度沿流动方向不断地降低。

图 3 为等离子体速度在喷枪内的分布图,图 3(a)为沿喷枪轴向剖面的速度分布示意图,图 3(b)为沿喷枪轴向的速度变化曲线。等离子体速度并没有在 A 点(图 1)前方附近达到最大值,而是随着与 A 点距离的增加等离子体的速度增大。

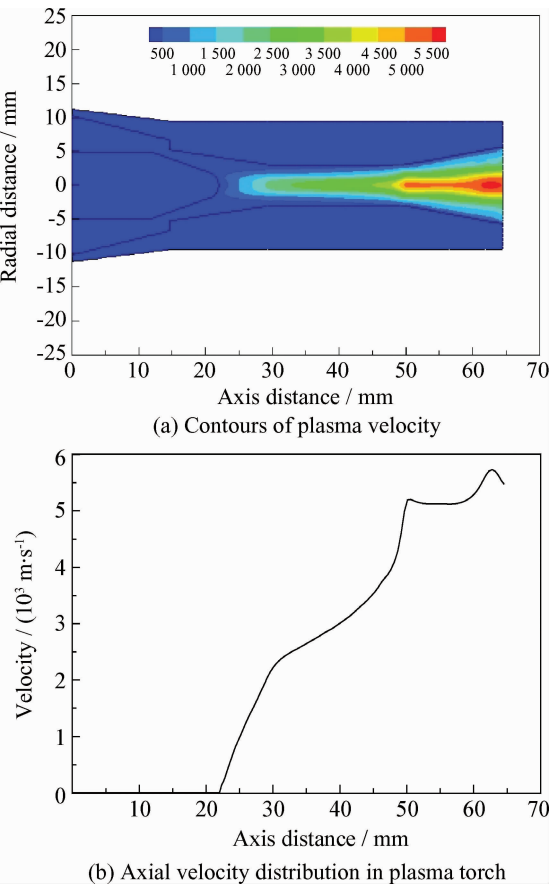


图 3 喷枪内速度云图及轴向速度分布
Fig. 3 Contours of plasma velocity and velocity distribution in plasma torch

图 3 表明等离子体在喷枪内部一直处于加速状态,这是因为 A 点前方附近的等离子体温度比较高,大量的工作气体经高温电弧电离。等离子体在受到阳极与阴极间有限的空间限制,从而导致等离子体的速度迅速升高。从能量转换的角度来看,这是工作气体由内能转化为动能的过程。等离子体到达拉瓦尔扩张段(CD 段)时,等离子体满足拉瓦尔喷管加速的条件,等离子体的速度进一步增加,在喷枪出口处达到了 5 400 m/s 左右。

3.2 喷枪出口处等离子体温度、速度分布

图 4 为喷枪出口处等离子体的温度沿径向分布示意图,从图中可以看出等离子体温度变化曲线具有一定的轴对称性,而且等离子体温度在中心轴线处的温度值最大,约为 14 700 K。

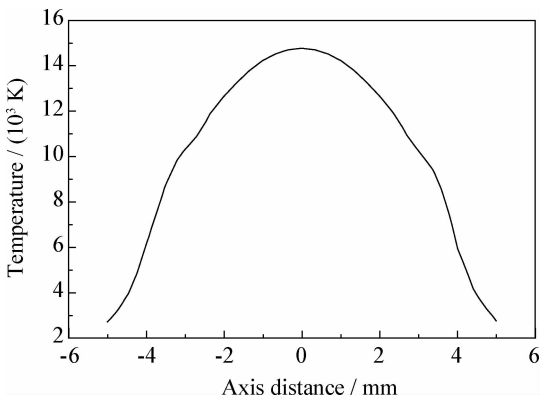


图 4 喷枪出口处温度径向分布
Fig. 4 Radial profiles of temperature at the torch exit

喷枪出口处径向马赫数与速度分布如图 5 所示,由图中可以看出等离子体的速度和马赫数均表现出对称性,但二者又存在差异。在中心轴线处等离子体的速度约为 5 400 m/s,马赫数约为 2.1。马赫数从中心开始沿径向不断减小,但是在距中心约 0.004 m 处出现了小幅增加的现象。

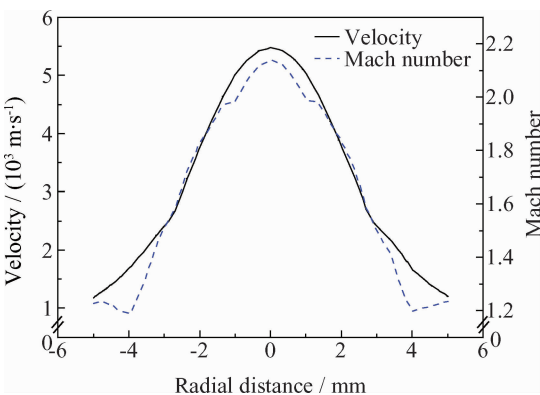


图 5 喷枪出口处速度和马赫数分布
Fig. 5 Velocity and Mach number at the torch exit

在图 4 和图 5 中,喷枪出口处等离子体的温度和速度呈现对称分布,这是计算过程中忽略了等离子体电弧的波动性引起的。而图 5 中的马赫数沿径向出现先减小而后在靠近阳极壁面附近又有小范围的增加的现象,这是由于马赫数是由等离子体的当地音速决定的。

3.3 喷枪外等离子体射流温度、速度和压力分布

图 6 所示为等离子体温度在喷枪外的分布示意图(喷枪外坐标原点为喷口轴向中心位置处),图 6(a)为轴向温度剖面图,图 6(b)为沿中心轴线方向的温度变化曲线图。图 6 显示出等离子体进入低压环境之后,等离子体的温度一直呈下降趋势,且刚冲出喷枪的等离子体温度下降幅度较大。在距离喷枪出口(点 D)约 0.3 m 处,等离子体温度依然高达 2 000 K。

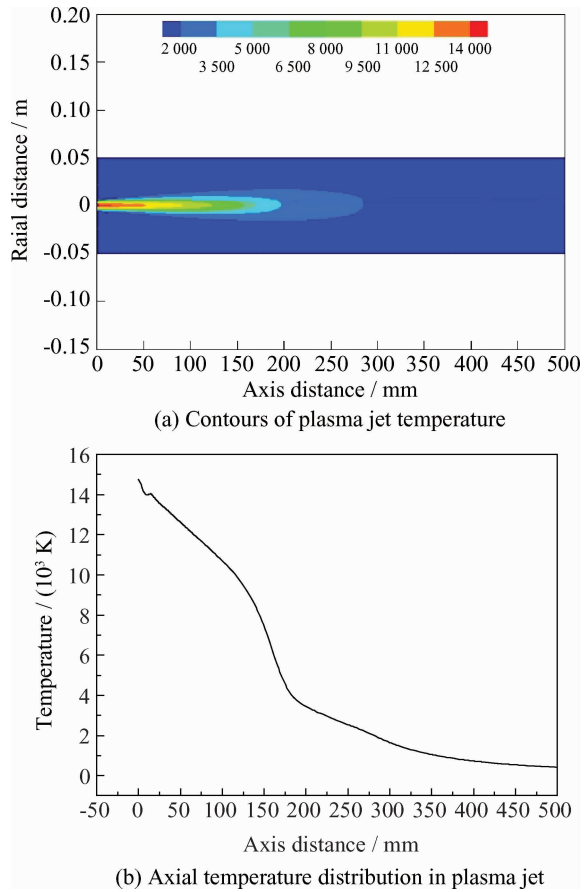


图 6 喷枪外温度云图和轴向温度分布

Fig. 6 Contours and temperature distribution in plasma jet

图 7 所示为等离子体速度在喷枪外的分布图,图 7(a)为沿轴向剖面的速度分布示意图,图 7(b)为沿中心轴线速度变化曲线图。等离子体进入周围环境之后,速度经历了先增加后减小的过程,总体上与喷枪外等离子体的温度变化趋势类似,等离子体速度在刚进入环境之后下降的幅度较大。

图 8 为喷枪外等离子体压力沿轴向分布示

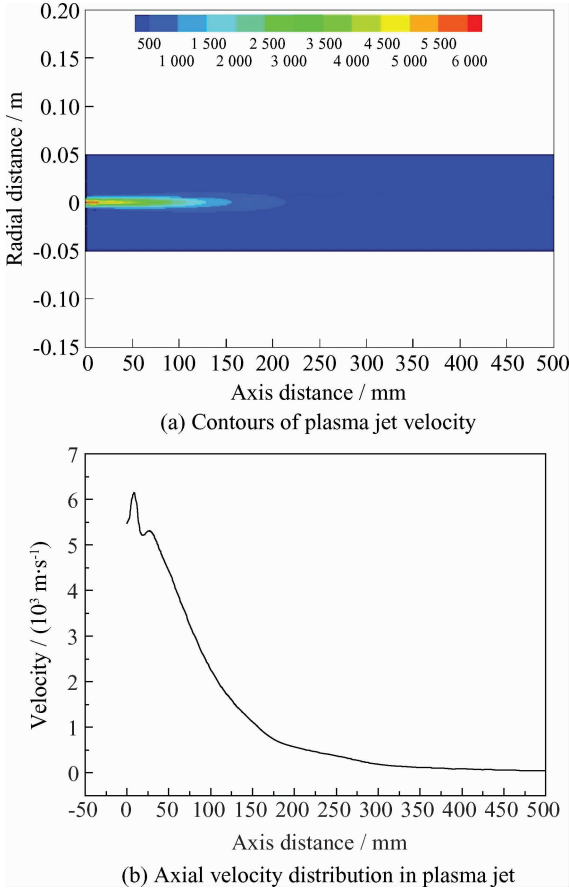


图 7 喷枪外速度云图和轴向速度分布

Fig. 7 Contours and velocity distribution in plasma jet

意图,等离子体离开喷枪出口后压力急速降低,随后在距离喷枪出口(D 点)约 0.01 m 处等离子体压力降到最低点,之后压力又开始升高,当到达距离 D 点约 0.02 m 处位置时压力又重新达到了一个峰值。等离子体压力经过多次升高与降低过程之后,最终达到了与环境压力一致的压力值。

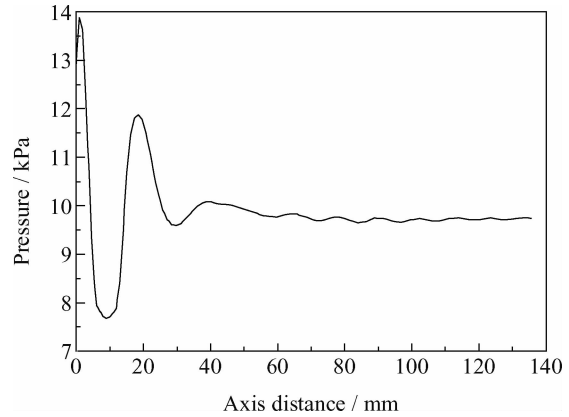


图 8 喷枪出口附近压力轴向分布图

Fig. 8 Pressure distribution near the exit torch

图 6 和图 7 表明等离子体离开喷枪出口之后温度和速度变化曲线都不断下降,而且在离喷枪出口约 0.01 m 处都出现了小范围的波动。这可以由图 8 解释,从图 8 中可以看出等离子体在出口处的压力要比环境压力 (10^4 Pa) 高出约 3 000 Pa,喷枪出口压力为了与环境压力持平会发生膨胀过程,膨胀最终的结果会引起等离子体的温度和速度发生上述变化。

喷枪外等离子体温度的下降主要是由于等离子体在流动过程中不断地卷吸周围环境中的冷气体,使之与等离子体进行强烈的热量与动量的交换。这一过程最终不仅使等离子体的温度迅速降低,而且也会使等离子体的速度下降。

3.4 对比分析

Gindrat M^[17] 等人采用 F4-VB 喷枪在 10^4 Pa、工作电流 600 A 和工作气体(Ar)流量 60 L/min 的工作条件下,通过测量的方式得到了在距离喷枪出口 0.04 m 处等离子体的温度为 10^4 K 的结果,这与本模拟得到的结果比较接近。

Peng Han^[18] 等人也在 10^4 Pa、工作电流为 600 A 和工作气体(Ar)为 65 L/min 的条件下,采用 F4-VB 喷枪对等离子体的传热与流动进行了模拟,最后得到了距离喷枪出口 0.01 m 处,射流温度为 14 000 K,射流速度为 5 500 m/s 的结果。这与同样位置处文中的结果比较接近。

通过以上比较和分析,说明采用 Fluent 软件模拟低压等离子体传热与流动的结果与国内外研究者采用其他方法模拟和测量的结果有较高的一致性。

4 结 论

(1) 等离子体温度在喷枪内阴极尖端附近达到最大值。在距离出口约 0.3 m 处时,等离子体依然保持较高的温度。

(2) 在喷枪外,等离子体射流温度逐渐降低,射流速度在喷枪出口附近达到最大值。在喷枪外部等离子体经历膨胀压缩过程,并影响相应位置等离子体温度速度变化。

参考文献

[1] 陈熙. 热等离子体传热与流动 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Chen X. Thermal plasma flow and heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese).

[2] 戴达煌, 周克崧. 现代材料表面技术科学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
Dai D H, Zhou K S. Modern science surface technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003 (in Chinese).
[3] Salhi Z, Klein D, Gougeon P, et al. Development of coating by thermal plasma spraying under very low-pressure condition < 1mbar [J]. Vacuum, 2005, 77(2): 145-150.
[4] Trelles J P, Chazelas C, Vardelle A, et al. Arc plasma torch modeling [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(5/6): 728-752.
[5] 毛杰, 邓畅光, 宋进兵, 等. 等离子喷涂过程中的等离子射流特性诊断技术 [J]. 材料保护, 2013, 46(3): 38-41.
Mao J, Deng C G, Song J B, et al. Review of diagnostic techniques for plasma jet characteristics in plasma spraying [J]. Journal of Materials Protection, 2013, 46(3): 38-41(in Chinese).
[6] Gindrat M, Hollenstein C, Loch M, et al. Plasma jet properties in a new spraying process at low pressure for large area thin film deposition [C]. Thermal Spray Conference, Singapore, 2001: 28-30.
[7] Ahmed I, Bergman T L. Three-dimensional simulation of thermal plasma spraying of partially molten ceramic agglomerates [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2000, 9(2): 215-224.
[8] 邝子奇, 刘敏, 邓畅光, 等. 低压等离子喷涂钨涂层性能的研究 [J]. 材料研究与应用, 2008, 2(3): 191-194.
Kuang Z Q, Liu M, Deng C G, et al. Study of tungsten coating sprayed by LPPS [J]. Materials Research and Application, 2008, 2(3): 191-194 (in Chinese).
[9] 邓畅光, 邓春明, 刘敏, 等. 大气和低压等离子体喷涂氧化铝涂层 [J]. 材料工程, 2008, 24: 48-51.
Deng C G, Deng C M, Liu M, et al. Air plasma and low pressure plasma sprayed alumina coating [J]. Materials Engineering, 2008, 24: 48-51 (in Chinese).
[10] Huang R, Fukanuma H, Uesugi Y, et al. An improved local thermal equilibrium model of DC arc plasma torch [J]. Plasma Science, IEEE Transactions on, 2011, 39(10): 1974-82.
[11] 周克崧, 刘敏, 邓春明, 等. 新型热喷涂及其复合技术的进展 [J], 中国材料进展, 2009, 28(9): 1-8.
Zhou K S, Liu M, Deng C M, et al. Recent development of the new thermal spray technology and combined technology [J]. Materials China, 2009, 28(9): 1-8 (in Chinese).
[12] Gonzalez J, Gleizes A. Comparisons between two and three dimensional models: Gas injection and arc attachment [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2002, 35(24): 3181-91.
[13] Li H P, Pfender E. Three dimensional modeling of the plasma spray process [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(2): 245-260.
[14] Valutherin B, Planche M P. Vapor deposition of metallic coatings by very low pressure plasma spraying [C]. Proceedings of the International Thermal Spray Conference, Republic of Korea, 2013: 1-7.

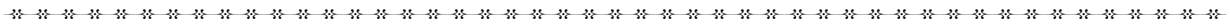
[15] 斯托克, 吴锡真. 物理手册 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2004.
Stoke, Wu X Z. Physics handbook [M]. Beijing: Peking University Press, 2004 (in Chinese).

[16] Jodoin B, Gindrat M, Dorier J L, et al. Modelling and diagnostics of a supersonic DC plasma jet expanding at low pressure [R]. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP), CH-1015 Lausanne (Switzerland), 2001.

[17] Gindrat M, Dorier J L, Hollenstein C, et al. Effect of specific operating conditions on the properties of LPPS plasma jets expanding at low pressure [J]. Proceedings of the 3rd ITSC, 2002: 459-464.

[18] Han P, Chen X. Modeling of the supersonic argon plasma jet at low gas pressure environment [J]. Thin Solid Films, 2001, 390(1): 181-185.

(责任编辑: 王文宇)



• 学术动态 •

第 19 届世界表面精饰大会暨展览会将于北京召开

第 19 届世界表面精饰大会(Interfinish 2016)将于 2016 年 9 月 20—22 日在北京国家会议中心举行。会议由国际表面精饰联盟(International Union for Surface Finishing, IUSF)主办,中国表面工程协会承办,主题为“面向未来工业的表面科学与工程”。大会将邀请国内外知名专家、学者就表面工程领域的热点问题进行交流。

会议现面向各大专院校、科研院所、公司企业征集表面工程领域的优秀论文(语言为英文)。大会将进行优秀论文评选,推荐高水平论文到 SCI 期刊上发表。

论文征集领域包括以下范围:①表面与界面基础理论:腐蚀机理、摩擦学、表面与界面科学;②先进表面处理技术:有机涂层/涂装、化学镀/电镀/复合镀/阳极氧化、热喷涂、转化膜、热浸镀、防锈、特种涂层、真空与等离子体技术/气相沉积、预处理、光刻蚀、粉末涂料、纳米技术、复合技术、溶胶—凝胶涂层;③表面技术在工业中的应用:能源、建筑、生物材料、机械、石油化工、冶金、航天航空等;④环境技术与生产管理:废水/废气/固废处理、清洁生产、质量管理体系、工业管理、标准化与检验。

论文模板见会议网站 www.interfinish2016.org, 请将 word 版本的稿件发送至 submit@interfinish2016.org。

(国际表面精饰联盟组委会 供稿)