

文章编号:1007-6735(2011)05-0065-06

## 操作参数对等离子体射流传热和流动的影响

漆 熙, 单彦广

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 应用大气压热等离子体射流传热与流动的三维数学模型, 预测了氩等离子体射流射入空气环境时的温度、速度及卷吸空气质量分数分布, 并与文献中同等条件下的实验结果进行了比较, 结果相吻合. 在此基础上, 分析了射流入口温度和速度变化、工作气体中添加高导热系数气体以及液料注入对射流卷吸环境空气和热等离子体射流传热与流动过程的影响.

**关键词:** 等离子体射流; 操作参数; 传热和流动; 数值模拟

**中图分类号:** TK 124      **文献标志码:** A

## Influence of Operating Parameters on Heat Transfer and Fluid Flow of a Plasma Jet

QI Xi, SHAN Yan-guang

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** A three-dimensional model was applied to predict the temperature, velocity and air concentration distribution of an argon plasma jet issuing into air atmosphere. Calculated results were validated with the experimental results under the same operating conditions. The effects of the inlet velocity inlet temperature, working gas additionally filled with high thermal conductivity gas and the injection of sprays on the air entrainment as well as the heat transfer and fluid flow of the plasma jet were investigated.

**Key words:** *plasma jet; operating parameters; heat transfer and fluid flow; simulation*

热等离子体喷涂是指在等离子体射流中喷入颗粒(或液体喷雾),使其在高温高速环境中加热加速,喷涂颗粒达到熔融或半熔融状态后高速撞击工件表面,迅速铺展并凝固形成所需涂层的工艺过程.热等离子体喷涂过程涉及等离子体射流

的传热和流动、颗粒(或液滴)的加热和运动以及射流与颗粒间的相互影响.颗粒在等离子体射流中的加热和运动与等离子体射流本身的传热和流动密切相关,而等离子体射流传热和流动特性主要取决于操作参数的选取.通过研究操作参数对

**收稿日期:** 2010-11-15

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50706027);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目;上海市重点学科建设资助项目(J50501)

**作者简介:** 漆 熙(1985-),男,硕士研究生.研究方向:热等离子体喷涂过程. E-mail: seven\_qixi@hotmail.com  
单彦广(联系人),男,副教授.研究方向:热等离子体喷涂过程. E-mail: shan@usst.edu.cn

射流传热和流动的影响,有助于理解颗粒在射流中的运动和加热历程,从而为优化热等离子体喷涂工艺过程提供理论参考.

Pfender 等<sup>[1]</sup>利用焓探测技术获得了氩等离子体射流射入大气环境下的温度、速度分布;同时,还通过色谱法得到了空气的质量分数分布情况,结果表明,随着等离子体射流往下游发展,卷吸进入等离子体射流中的空气质量分数越来越大,Pfender 通过实验获得的结果为进一步研究等离子体射流的传热和流动奠定了一定的基础.Semenov 等<sup>[2]</sup>则通过实验主要研究了等离子体射流的温度分布情况,考察了不同功率下等离子体射流温度的变化,结果表明随着操作功率的增大,相同位置等离子体射流的温度增加,获得的实验数据对数值模拟研究及喷涂材料等的选择具有参考价值.单彦广等<sup>[3]</sup>则通过建立喷雾液滴在等离子体射流中的流动和传输过程的三维数学模型,模拟得到了颗粒在基体表面的粒径、温度、速度以及空间位置的分布情况,说明原料颗粒在等离子体射流中的加热和运动历程对于制备涂层的质量有重要影响.本文应用大气压等离子体射流传热与流动的三维数学模型,以及 RNGk- $\epsilon$  湍流模型预测了氩等离子体射流射入大气环境下的温度、速度分布,并与文献中同等条件下的实验结果进行了比较.在此基础上,分析了射流入口温度和速度变化对射流卷吸环境空气的影响、工作气体中添加高热系数气体以及液体喷雾对等离子体射流传热和流动的影响.研究结果对强化热等离子体射流和颗粒之间的传热有参考意义.

## 1 数学模型

对等离子体射流的模拟做如下假设:

a. 流体为变物性的不可压缩流体,三维稳态流动;

b. 忽略黏性耗散与压力功项及重力的影响;

c. 射流处于局域热力学平衡且符合光学薄假定.

根据假设条件,求解质量方程、动量方程、能量方程及组分方程,采用 RNGk- $\epsilon$  湍流模型<sup>[3]</sup>(以下简称 RNG 湍流模型).图 1 所示为等离子体射流模型的计算域.

图 1 中 AB、CD 为固体壁面,EF 为工件表面,温度设为 500 K,速度为无滑移边界条件,等离子体炬的壁面温度  $T_w = 500$  K,壁面速度  $u = v = 0$ .射流自由边界 AF、DE 采用压力进口边界条件,空气

温度取 300 K.定义射流入口 BC 为速度入口边界,其温度、速度分布为

$$T = (T_0 - T_w) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_m} \right)^{n_T} \right] + T_w \quad (1)$$

$$V = V_0 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_m} \right)^{n_V} \right] \quad (2)$$

式中, $R_m$ 为射流进口半径; $T_0$ 为等离子体进口的最高温度, $T_0 = 12\,913$  K; $V_0$ 为等离子体进口的最大速度, $V_0 = 1\,092$  m/s;根据质量守恒和焓守恒,根据实验取  $n_T$  为 2.3, $n_V$  为 1.4.射流入口的湍动能以及湍动能耗散率为<sup>[4-5]</sup>

$$k(r) = \kappa V_0^2 \left| \frac{\partial v}{\partial r} \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)_{\max} \right| \epsilon = k^{3/2} / L \quad (3)$$

式中, $\kappa$ 为调节因子; $\frac{\partial v}{\partial r}$ 为径向速度梯度;特征长度  $L = 0.075 \delta_{0.1} / C_\mu^{3/4}$ ,其中, $\delta$ 为边界层厚度; $C_\mu$ 为经验常数.

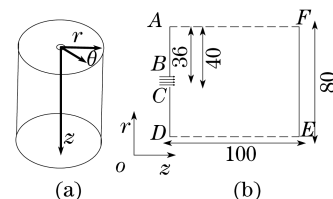


图 1 计算域示意图

Fig.1 Computation domain of the plasma jet

## 2 结果与讨论

模拟了常压下氩等离子体射流喷入空气中的传热和流动过程,模拟的等离子体喷枪的具体操作参数如表 1 所示,等离子体热物性参数取自文献[6].使用的实验数据来自 Fincke 等<sup>[4]</sup>人通过焓探针测量技术,得到的射流对称轴线上不同位置温度、速度及空气质量分数分布结果.模拟采用的操作参数和实验相同.

表 1 等离子体炬操作参数

Tab.1 Operating parameters of the plasma gun

气体流量 Q/ (L·min <sup>-1</sup> )	操作电压 U/V	操作电流 I/A	电功率 P/kW	热效率 η/%	环境压力 p/kPa
35.4	15.4	900	13.86	70	85.5

由于等离子体入口处温度和速度沿轴向和径向变化剧烈,故对射流入口段的网格加密处理,网格划分如图 2 所示.采用了 3 种网格划分方案,分别为网格 1:20×40×50、网格 2:24×44×54 和网格 3:30

$\times 48 \times 60$ . 网格考核计算结果如图3所示,从图中可以发现,上述3种网格密度下的模拟结果变化很小. 考虑液体喷雾计算对网格要求较高,最终采用加密后的网格3划分方案.

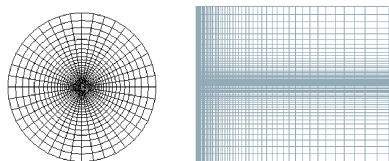
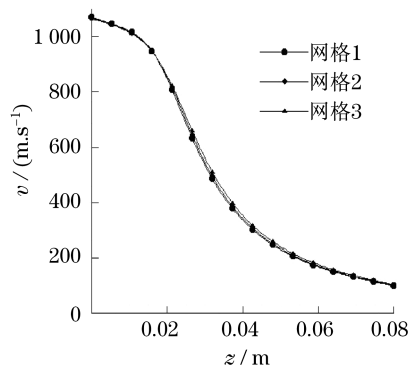
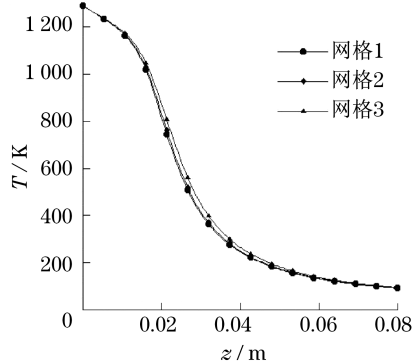


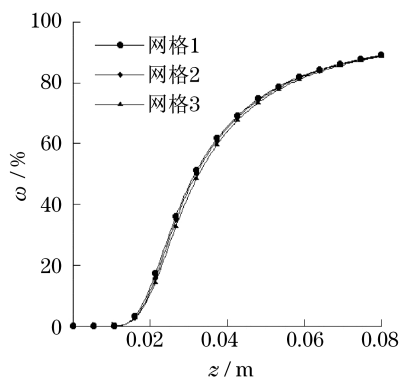
图2 计算域网格划分  
Fig.2 Computational mesh



(a) 速度分布



(b) 温度分布



(c) 空气质量分数分布

图3 不同网格划分方案下对称轴线上的速度、温度及空气质量分数分布

Fig.3 Comparisons of the simulation results for different mesh densities

## 2.1 氩等离子体射流速度、温度及组分分布

图4和图5分别为采用 RNG 湍流模型预测的射流对称截面上的温度和速度分布. 从图中可以发现,等离子体射流射入大气环境后,速度和温度不仅在射流轴线方向逐渐减小,沿着径向方向速度和温度同样逐渐衰减,而且随着射流的发展,等离子体射流的温度和速度衰减加剧. 这是由于随着射流往外缘发展,等离子体射流与冷空气的卷吸作用愈明显,等离子体与冷空气之间能量和动量交换更加剧烈,从而导致等离子体射流温度和速度的急剧下降.

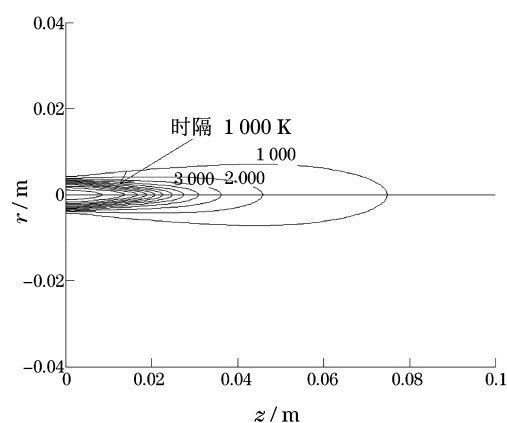


图4 采用 RNG 湍流模型时射流对称截面上的温度分布  
Fig.4 Temperature distribution with RNG turbulence model

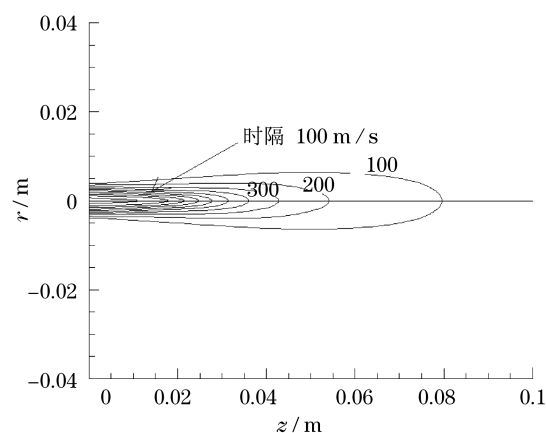
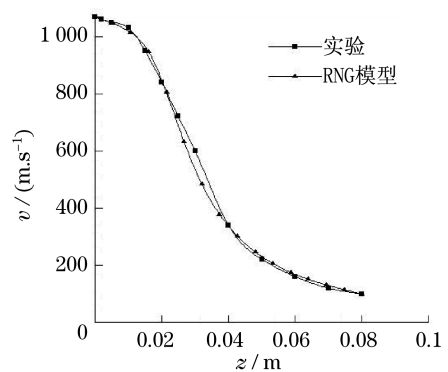


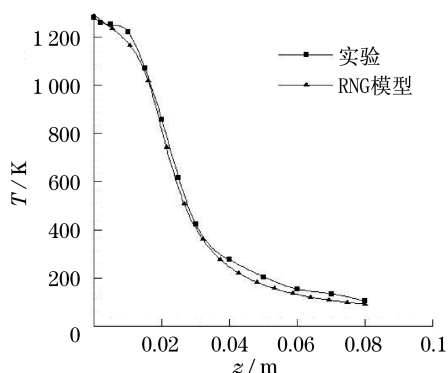
图5 采用 RNG 湍流模型时射流对称截面上的速度分布  
Fig.5 Velocity distribution with RNG turbulence model

图6(见下页)为采用 RNG 湍流模型时,等离子体射流对称轴线上的速度、温度及空气质量分数分布与实验结果比较. 从图中可以得出,采用 RNG 湍流模型时的计算结果与实验结果吻合较好,在射流出口的核心区段,射流温度和速度变化较为平缓,射流核心区域气体组分主要以氩气为主,卷吸的空气质量很少. 随着射流的发展,由于和环境空气的剧

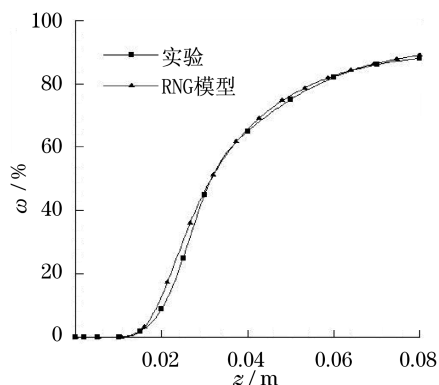
烈卷吸和混合,等离子体射流的速度、温度迅速衰减,卷吸进入射流中的空气也急剧增加.



(a) 速度分布



(b) 温度分布



(c) 空气质量分数分布

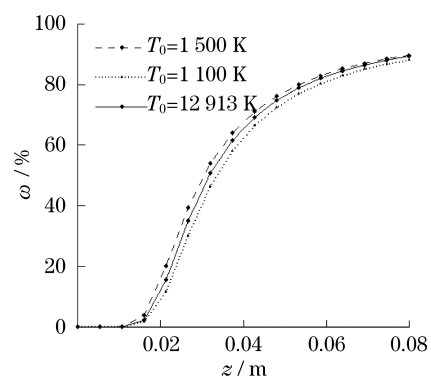
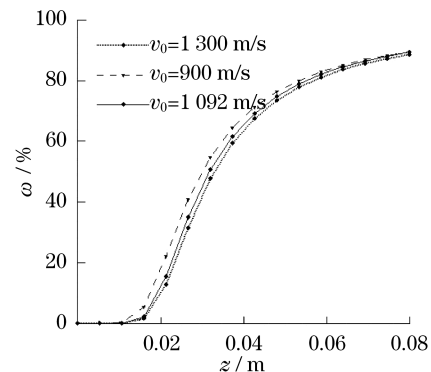
图6 采用 RNG 湍流模型时对称轴线上速度、温度及空气质量分数分布与实验结果的比较

Fig.6 Comparisons between the simulation and experimental results with RNG turbulence model

## 2.2 入口温度和速度对射流卷吸空气的影响

为了研究等离子体射流入口速度和温度对卷吸环境空气的影响,分别模拟了入口最高温度保持不变时(12 913 K),速度的变化对射流轴线上空气质量分数的影响(见图 7(a));以及保持入口最大速度不变时(1 092 m/s),温度的变化对射流轴线上空气

质量分数的影响(见图 7(b)).从图中可以看出,当入口最高温度保持不变时,随着入射速度的提高,射流轴线上空气质量分数下降.这是由于入口速度提高时,尽管卷吸进来的空气质量有所增加,但射流气体质量的增加超过了卷吸进来的空气质量的增加,最终导致空气的相对质量分数下降.当入口最大速度保持不变时,随着入口温度的提高,射流轴线上空气质量分数增加.这是由于入口温度提高时,射流入口处气体密度降低,使得等离子体射流气体流量减少,而此时卷吸的空气质量基本不变,从而导致空气的相对质量分数增加.所以在制备金属涂层时,在保证金属颗粒有效加热的情况下,可以适当的降低射流温度,提高射流速度,以减少射流对环境空气的卷吸,从而减少金属喷涂颗粒及涂层表面的氧化.



(b) 入口温度变化对环境卷吸空气影响

图7 入口速度和温度变化对等离子体射流卷吸环境空气的影响

Fig.7 Effect of the inlet velocity and temperature on air entrainment

## 2.3 工作气体组分对等离子体射流的影响

图8是工作气体分别为纯氩及氩气和氢气(质量分数之比为9:1)时等离子体射流在rz截面(见图1)上的速度分布图8(a)和温度分布图8(b)比较结果.从图中可以发现,工作气体为氩-氢混合物时,等离子体射流的速度衰减和纯氩时相比变化不大,但

是等离子射流的高温区和纯氩时相比得到了显著扩展.以  $z = 50$  mm 处为例,当工作气体为氩气和氢气混合物时,等离子射流温度分布在 6 000 K 左右,而工作气体为纯氩气时,同样位置等离子射流温度已经降低至 1 000 K 左右.图 9 是工作气体分别为氩-氢(质量分数之比为 9 : 1)和氮-氢(质量分数之比为 9 : 1)混合物时,等离子体射流在  $rz$  截面上的速度分布(图 9(a)) and 温度分布(图 9(b)) 比较结果.从图中可以看出,与氩-氢混合物相比,当工作气体为氮-氢混合物时,等离子体射流的速度、温度分布变化相当.这是因为在一个大气压下,常温氩气与氮气的热导率相差不大,然而,氢气的热导率在高温时为氩气(或氮气)的数倍,所以在实际操作过程中,通常可以考虑在工作气体中添加一些高导热系数的气体(如氢气),即以氩-氢(或氮-氢)等气体混合物作为等离子体的工作气体,以强化射流和喷涂材料颗粒之间的传热.

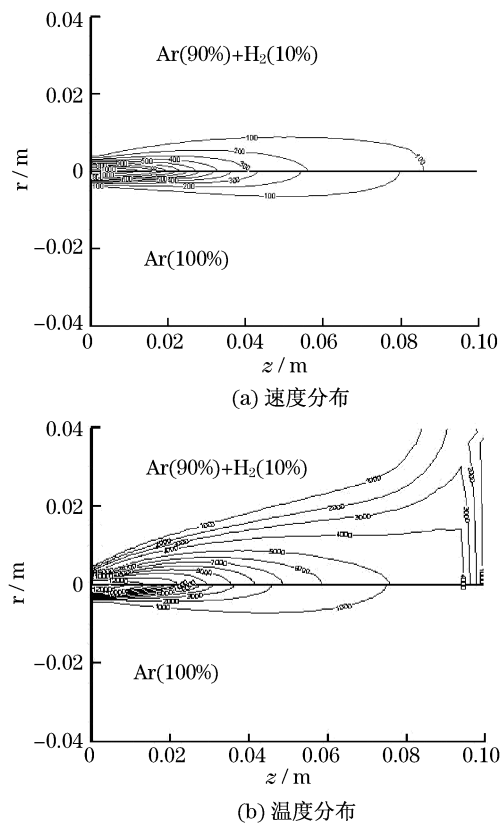


图 8 氩气中加入少量氢气后等离子体射流速度分布和温度分布比较

Fig.8 Comparisons of temperature and velocity distributions of the plasma jet ( $\text{Ar} + \text{H}_2$  and  $\text{Ar}$ )

#### 2.4 液体喷雾对等离子体射流的影响

液体喷雾以一定的速度注入等离子体射流中,

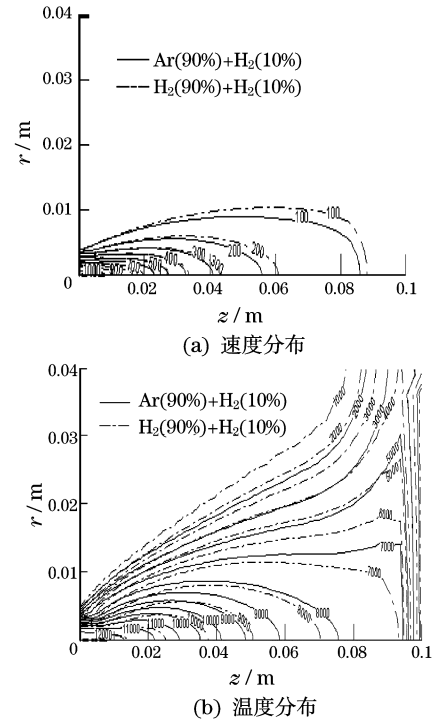


图 9 工作气体分别为氩-氢和氮-氢气体混合物时等离子体射流速度分布和温度分布比较

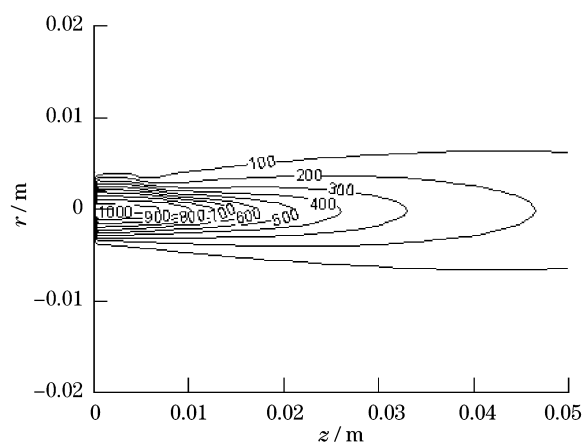
Fig.9 Comparisons of temperature and velocity distributions of the jet ( $\text{Ar} + \text{H}_2$  and  $\text{N}_2 + \text{H}_2$ )

等离子体射流为液滴提供了加速和加热的环境,这个过程中液滴与等离子体之间进行着一系列的动量、能量以及质量交换.因此,液滴的注入会对等离子体射流产生一定的影响.本文模拟了氧化锆醋酸盐溶液喷雾对等离子体射流传热和流动的影响,喷口的中心坐标为 0.005, 0.01, 0 m, 沿  $r$  轴负方向喷入,雾化形成的液滴颗粒粒径大小分布在 5~60  $\mu\text{m}$  之间,平均大小为 28.5  $\mu\text{m}$ .

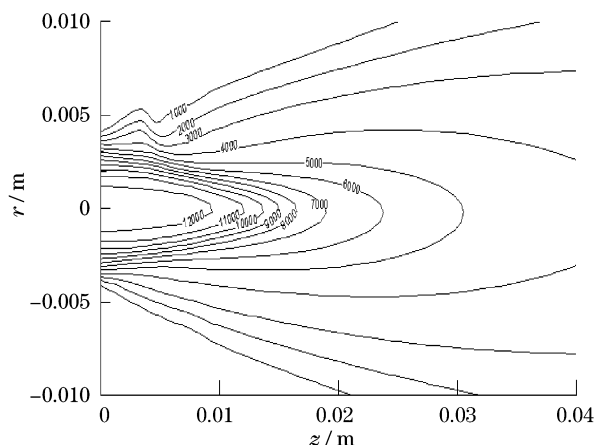
图 10(见下页)为等离子体射流在射流对称截面( $rz$  截面)上的速度分布和温度分布的局部放大图,图 11(见下页)为在  $z = 5$  mm 截面上的射流速度和温度分布.从图中可以看出,由于喷雾液滴蒸发及喷雾和射流之间的动量和能量交换,使得等离子体射流的温度分布发生显著变化,射流局部冷却明显.就相对温度变化而言,速度分布变化不大.这表明,对于喷雾在等离子体射流中运动和蒸发的模拟,应当考虑喷雾和射流之间的双向耦合作用.

### 3 结论

a. 在保证颗粒有效加热的情况下,可以适当地



(a) 喷雾对速度分布的影响



(b) 喷雾对温度分布的影响

图 10 液体喷雾对等离子体射流对称截面上速度分布和温度分布的影响

Fig. 10 Velocity and temperature distribution with sprays

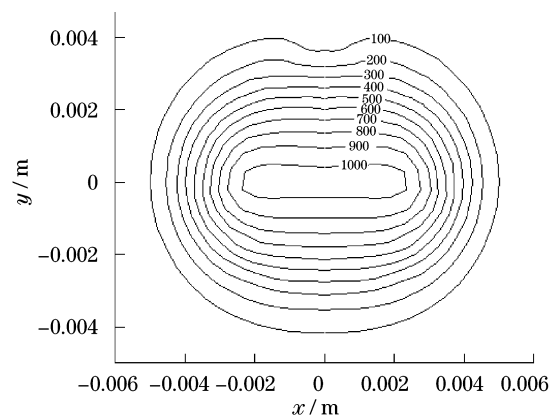
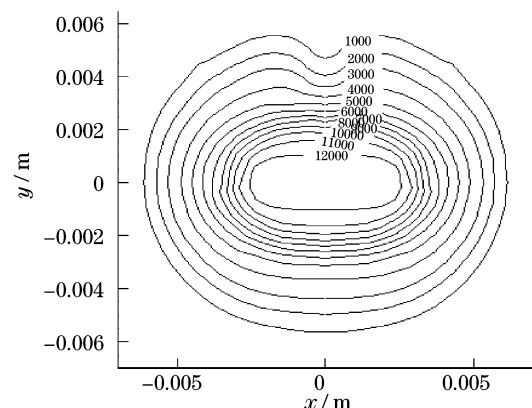
降低射流温度,提高射流速度,以减少射流对环境空气的卷吸,从而减少喷涂颗粒及涂层表面的氧化.

b. 工作气体中添加少量高热系数的气体(如氢气),以氩-氢和氮-氢等气体混合物作为等离子体工作气体,可以使等离子体射流的高温区得到显著扩展,有利于强化等离子体射流与颗粒间的传热.

c. 对于喷雾在等离子体射流中运动和蒸发的模拟,应当考虑喷雾和射流之间的双向耦合作用.

#### 参考文献:

- [1] Pfender E, Brossa M. Probe measurements in thermal plasma[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1988, 8(1): 75-90.
- [2] Semenov S, Cetegen B. Spectroscopic temperature measurements in direct current arc plasma jets used in

(a)  $z=5$  mm 截面上速度分布(b)  $z=5$  mm 截面上温度分布图 11  $z=5$  mm 截面上等离子体射流的速度分布和温度分布Fig. 11 Velocity and temperature distribution on  $z=5$  mm plane

thermal spray processing of materials[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2000, 5(10): 326-336.

- [3] Shan Y G, Coyle T, Mostaghimi J. 3D modeling of transport phenomena and the injection of the solution droplets in the solution precursor plasma spraying[J]. Thermal Spray Technology, 2007, 16(5/6): 736-743.
- [4] Fincke J R, Chang C H, Haggard D C. Entrainment and demixing in subsonic thermal plasma jets: comparison of measurements and predictions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(11): 1673-1682.
- [5] Leschziner M A, Rodi W. Computation of strongly axisymmetric free jets[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1984, 22(12): 1742-1747.
- [6] 陈熙. 热等离子体传热与流动[M]. 北京: 科学出版社, 2009.