

# 层流与湍流等离子体冲击射流特性比较

王海兴<sup>1</sup> 陈 熙<sup>2</sup> 潘文霞<sup>3</sup> 程 凯<sup>2</sup>

( 1. 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100083; 2. 清华大学工程力学系, 北京 100084;  
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100080 )

**摘 要** 本文采用数值模拟方法, 对层流与湍流氩等离子体射流在空气环境中冲击平板时的流动与传热特性进行了对比研究。结果表明, 在平板和射流进口间的距离较大时, 平板的存在只对其附近的射流参数分布有较大影响, 层流等离子体冲击射流的温度与轴向速度的轴向梯度明显小于湍流等离子体冲击射流情形; 由于在平板表面形成的径向壁面射流对引射的附加贡献, 层流和湍流等离子体冲击射流对环境空气的引射量明显增加。

**关键词** 热等离子体; 层流与湍流等离子体; 冲击射流; 数值模拟

**中图分类号**: TK124; TG402 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2007)04-0652-03

## COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS OF LAMINAR AND TURBULENT IMPINGING PLASMA JETS

WANG Hai-Xing<sup>1</sup> CHEN Xi<sup>2</sup> PAN Wen-Xia<sup>3</sup> CHENG Kai<sup>2</sup>

(1. School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;  
2. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China ;  
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Modeling study is performed to compare the flow and heat transfer characteristics of laminar and turbulent argon plasma jets impinging normally upon a flat plate (workpiece) in ambient air. It is found that when the plate standoff distance is comparatively large, the effect of the plate on the jet parameters only appears in the region near the plate, and the axial decaying-rates of the plasma temperature and axial velocity along the axis of the laminar plasma impinging-jet are appreciably less than their turbulent counterparts. The radial wall jet formed on the plate surface appreciably enhances the mass flow rate of the ambient air entrained into the laminar or turbulent impinging plasma jet.

**Key words** thermal plasma; laminar and turbulent plasma; impinging jet; modeling

## 1 引 言

等离子体冲击射流常用于热障涂层的制备、金属表面的重熔硬化以及不锈钢表面的熔覆等。实际应用中, 等离子体射流通常处于湍流状态, 湍流射流的流动不稳定等缺点限制了其更广泛的应用。采用精心设计的等离子体发生器可以有效地限制电弧弧根在阳极表面大幅度轴向运动, 从而可能产生出安静、稳定的层流等离子体长射流<sup>[1,2]</sup>。和常见的湍流等离子体射流相比, 层流等离子体射流对环境气体的引射量少, 从而高温区长、等离子体参数的轴向梯度小, 这些优点使其有广阔的应用前景。

为了加深对层流等离子体射流的了解, 本文在

文献 [3] 的基础上, 对层流与湍流氩等离子体射流在空气环境中垂直冲击平板时的流动与传热特性进行模拟研究, 以揭示它们之间的差异。

## 2 数值模拟方案

本文在等离子体冲击射流数值模拟中采用的基本假定包括: (1) 等离子体流动定常、轴对称; (2) 等离子体处于局域热力学平衡态、对辐射为光学薄; (3) 周向速度分量可以忽略。基于这些假定, 模拟层流氩等离子体射流在空气环境中垂直冲击平板时采用如下的质量、动量、能量与组分守恒方程:

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

收稿日期: 2007-01-12; 修订日期: 2007-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50336010; No.10405015; No.10575127)

作者简介: 王海兴 (1969-), 男, 山东济南人, 博士, 主要从事热等离子体条件下流动与传热问题研究。

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho uv)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r\mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho uv)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] - 2\mu \frac{v}{r^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uh)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho uh)}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right] - \\ U_r - \frac{\partial}{\partial x} [(h_A - h_B) J_x] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(h_A - h_B) J_r] - \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k}{c_p} (h_A - h_B) \frac{\partial f_A}{\partial x} \right] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{k}{c_p} (h_A - h_B) \frac{\partial f_A}{\partial r} \right] & \quad (4) \\ \frac{\partial(\rho u f_A)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho u f_A)}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \Gamma_f \frac{\partial f_A}{\partial x} \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \Gamma_f \frac{\partial f_A}{\partial r} \right] + S_f & \quad (5) \end{aligned}$$

此处  $u$  与  $v$  分别是轴向 ( $x$ -) 与径向 ( $r$ -) 速度分量;  $\rho$ 、 $h$  与  $f_A$  分别为氩-空气混合物的密度、比焓与氩的质量分数;  $\mu$ 、 $k$ 、 $c_p$  和  $\Gamma_f$  分别是随温度与成分变化的分子粘性系数、热导率、定压比热和扩散系数;  $h_A$  与  $h_B$  分别为纯氩与空气的比焓;  $U_r$  是单位体积的辐射功率;  $J_x$  和  $J_r$  是混合物中氩组分的质量扩散通量<sup>[3,4]</sup> 向量在  $x$ - 方向和  $r$ - 方向的分量。方程 (5) 中的源项  $S_f$  的表达式, 见文献<sup>[3]</sup>。

对于湍流等离子体射流, 上述方程中所有的物理量均为它们的时间平均值, 并且所有的输运系数均需改为包含湍流输运与分子输运两部分, 其中湍流粘度由湍流动能及其耗散率计算, 并采用  $K-\epsilon$  双方程模型进行湍流模拟<sup>[3]</sup>。射流进口半径取为 4 mm; 计算域径向尺寸为 50 mm, 射流进口至平板表面之间的轴向距离  $L$  在 10 mm 至 100 mm 之间变化。在射流进口处,  $f_A = 1$ ,  $v = 0$ , 等离子体温度与轴向速度采用如下分布形式<sup>[3]</sup>:

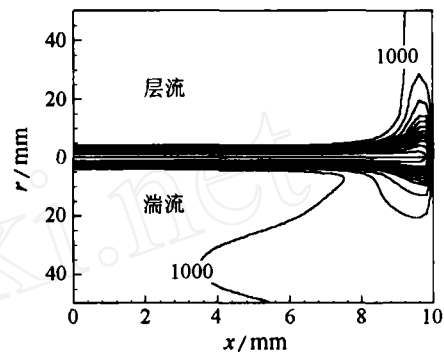
$$\begin{aligned} T &= (T_0 - T_w) [1 - (r/R_{in})^{2.3}] + T_w, \\ u &= U_0 [1 - (r/R_{in})^{1.4}] \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $T_w$ 、 $T_0$  与  $U_0$  分别为射流喷管内壁面温度 (700 K)、射流进口中心处的最高温度与最高速度。在等离子体发生器的端壁和平板表面处, 层流情况下采用无滑移、温度给定和扩散通量为零的条件, 湍流情况下采用壁面函数法处理。其余边界条件与文献

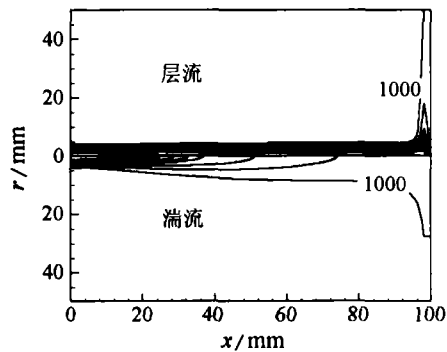
[3] 中类似。数值模拟中采用  $180 \times 78$  的计算网格, 以 SIMPLE 型算法进行控制方程的求解。

### 3 数值模拟结果与讨论

为了更好地比较层流与湍流等离子体冲击射流的流动与传热特性, 我们采用相同的射流进口中心温度  $T_0$  (14000 K) 和速度  $U_0$  (1000 m/s) 进行数值模拟研究<sup>[3]</sup>。



(a)  $L=10$  mm



(b)  $L=100$  mm

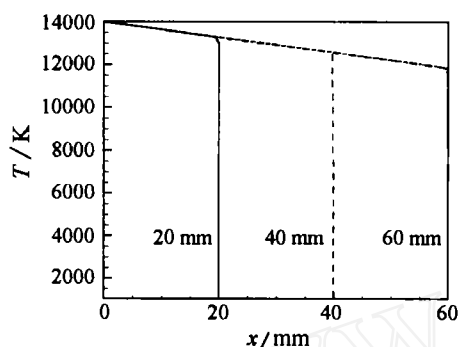
图 1 典型的层流与湍流等离子体冲击射流中的等温线分布 (等温线间隔 1000 K)

图 1 比较了当射流进口与平板间距离分别为  $L=10$  mm 与  $L=100$  mm 时, 层流 (上半平面) 与湍流 (下半平面) 等离子体冲击射流中的温度分布。从图 1 可以看出, 当射流进口与平板之间的距离比较大时, 由于湍流射流对环境气体的引射量远大于层流等离子体射流情形<sup>[3]</sup>, 湍流射流中温度的轴向衰减率比层流时大得多, 平板表面中心附近的气体温度也远小于层流情形。然而, 在射流进口与平板之间距离比较小时, 由于湍流等离子体射流流场中出现的大回流涡的挤压, 层流与湍流等离子体冲击射流高温区的温度分布差别不大。

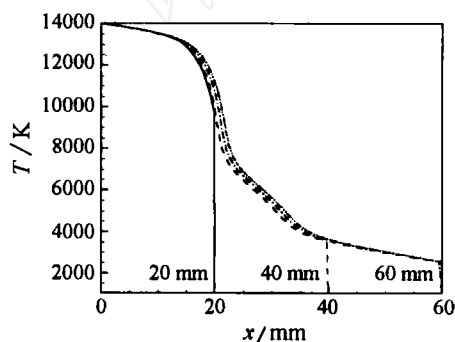
图 2 给出了射流进口与平板之间的距离 (图中以数字表示) 变化时, 层流和湍流等离子体射流中的温度沿射流轴线的变化。从图中可以看到, 由于等

离子体射流不停地引射环境空气,随着轴向距离的增加,等离子体温度逐渐减小,在平板表面附近则急剧减小,表明平板的存在仅明显影响其壁面附近的射流参数。对轴向速度分布也得到类似计算结果。

图 3 给出了射流进口与平板之间的距离变化时,等离子体射流对环境空气的引射量沿轴向的变化,并与相应的自由射流结果(图 3 中的虚线表示)进行比较。平板的存在不仅改变了主射流的方向,

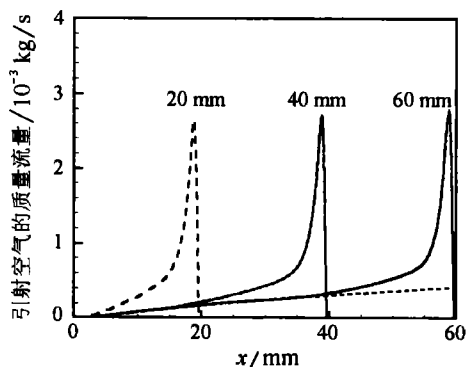


(a) 层流

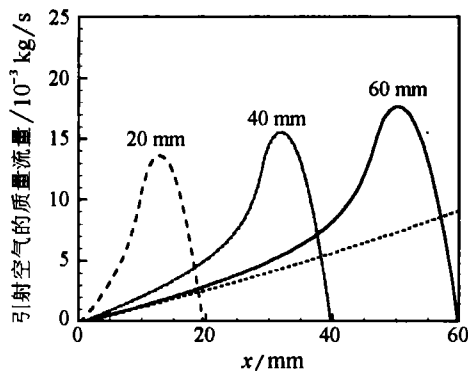


(b) 湍流

图 2 层流与湍流等离子体冲击射流中的温度沿射流轴线的变化



(a) 层流



(b) 湍流

图 3 层流与湍流等离子体冲击射流中的引射量沿射流轴线方向的变化

而且由于平板表面处形成的径向壁面射流对引射的附加贡献,显著地增加了对环境空气的引射量;等离子体射流的最大引射量随轴向距离的增加而增大;层流等离子体射流对环境空气的引射量明显小于湍流等离子体射流。

## 4 结 论

本文对层流与湍流氩等离子体射流在空气中垂直冲击平板时的流动与传热特性的对比研究表明:由于沿平板表面形成了径向壁面射流,冲击射流对环境气体的引射量明显大于相应的自由射流,特别是对于层流情形更是如此。平板的存在只对壁面附近的等离子体射流参数有较大影响;在平板-射流进口间的距离较大时,层流等离子体射流参数的轴向梯度明显小于湍流等离子体射流情形。

## 参 考 文 献

- [1] Pan W X, Zhang W Hua, Zhang W Hong, et al. Generation of Long, Laminar Plasma Jets at Atmospheric Pressure and Effects of Flow Turbulence. *Plasma Chem. Plasma Process*, 2001, 21(1): 23-35
- [2] Pan W X, Meng X, Chen X, et al. Experimental Study on the Thermal Argon Plasma and jet Length Change Characteristics at Atmospheric Pressure. *Plasma Chem. Plasma Process*, 2006, 26(4): 335-345
- [3] Cheng K, Chen X, Pan W X. Comparison of Laminar and Turbulent Thermal Jet Characteristics—a Modeling Study. *Plasma Chem. Plasma Process*, 2006, 26(3): 211-235
- [4] Murphy A B. Diffusion in Equilibrium Mixtures of Ionized Gases. *Phys. Rev. E.*, 1993, 48(5): 3594-3603