

屏蔽气体对氩等离子体冲击射流的影响

程 凯¹ 陈 熙¹ 潘文霞² 王海兴¹

(1. 清华大学航天航空学院, 北京 100084; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 在空气环境中利用氩等离子体射流进行材料加工时, 环境空气卷吸进入射流可能会引起金属材料氧化。采用同轴屏蔽气体保护是减小该不利影响的一种可行方案。为此本文对空气环境中层流氩等离子体冲击射流特性受屏蔽气体影响问题进行了数值模拟研究, 重点考察了屏蔽气体速度等对材料加工区氧含量的影响。

关键词 氩等离子体; 冲击射流; 屏蔽气保护; 射流卷吸; 组分扩散

中图分类号: TK124, TG402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2005)06-1019-03

EFFECTS OF SHROUD GAS ON LAMINAR ARGON PLASMA JETS
IMPINGING ON A SUBSTRATE IN AMBIENT AIRCHENG Kai¹ CHEN Xi¹ PAN Wen-Xia² WANG Hai-Xing¹

(1. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract When materials processing using laminar argon plasma jets is performed in ambient air, the entrainment of air into the jets will lead to the oxidation of processed metallic materials. Employing a co-axial shrouding gas is a feasible approach to reduce the undesirable material oxidation. This paper studies numerically the effects of the shrouding gas on the characteristics of the laminar argon plasma jet impinging normally upon a flat substrate located in air surroundings. The effects on the jet flow and heat/mass transfer characteristics are investigated of many related parameters, especially of the shroud gas velocity.

Key words argon plasma; impinging jet; shrouding gas; jet entrainment; species diffusion

1 引 言

当采用热等离子体射流在空气环境中进行材料加工, 如进行涂层制备或金属材料的熔凝、熔敷时, 环境空气会被卷吸进入材料的加工区, 引起金属材料的氧化。过度的氧化往往是人们所不希望的。

对于湍流等离子体射流, 被卷吸进射流的环境空气量较大, 即使采用纯氩作为等离子体射流的形成气体, 距离射流进口几厘米后射流中的主要气体成分即已变为空气^[1]。从抑制环境空气卷吸的角度看, 最近成功产生出来的长层流等离子体射流^[2]具有明显的优势, 由于此时仅有分子扩散机制参与, 卷吸进长层流氩等离子体射流的环境空气量可大大减少。然而, 即使对于长层流氩等离子体射流, 环境空气向射流中的卷吸仍不能完全避免^[3], 因而在要求较高的场合, 材料氧化仍是不可忽视的问题。

在不采用专门为隔绝环境空气而设置的加工室条件下, 为了减小工件或基板表面加工区附近的氧含量, 可以采取这样一些办法: (1) 将基板放置在离层流氩等离子体射流发生器出口(或射流进口)尽可能近的位置处; (2) 提高等离子体射流的进口速度; (3) 以“同轴屏蔽气体”对射流加以保护。前两种方案的采用, 需考虑到实际使用的装置和工艺条件的限制, 采用同轴屏蔽气体进行保护则不失为一个简便易行的方案。以此为背景, 本文采用数值模拟方法就同轴屏蔽气体对层流氩等离子体碰撞射流特性的影响问题进行研究, 着重考察屏蔽气体对射流的材料加工区中氧含量的影响。

2 数值模拟方案

图 1 是本文所研究的轴对称体系上半截面的示

收稿日期: 2005-03-15; 修订日期: 2005-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (Nos. 50336010, 50276065, 10405015)

作者简介: 程凯 (1978-), 男, 江苏泰州人, 博士生, 主要从事热等离子体流动与传热问题研究。

意图和计算域。其中 NDE 左边是带后向台阶 BCD 的等离子体发生器, ND 是发生器的出口截面; EF 是屏蔽气出口缝隙; GH 是屏蔽气遮罩的端面; LK 是基板; IJ 和 JK 是处于环境空气中的自由界面。

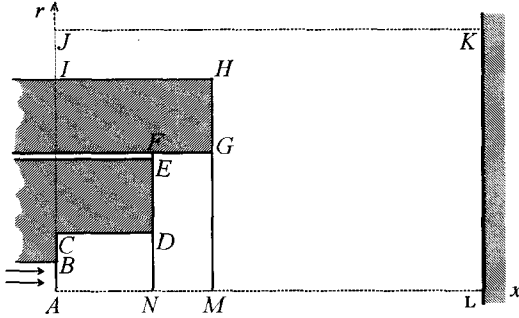


图1 具有同轴屏蔽气体保护的冲击射流和计算域

本文研究中取 $A-J-K-L-A$ 为计算域。计算中取发生器通道内半径 $|AB| = 2 \text{ mm}$; 发生器出口内半径 $|ND| = 4 \text{ mm}$; 壁厚 $|BI| = 33 \text{ mm}$; 台阶区长 $|CD| = 8 \text{ mm}$; 自由引射区高度 $|IJ| = 15 \text{ mm}$; 基板与发生器出口距离 $|NL| = 10 \text{ mm}$; 屏蔽罩遮盖伸出长度 $|FG| = 5 \text{ mm}$; 屏蔽气出口缝宽 $|EF| = 0.2 \text{ mm}$; 屏蔽气出口外边缘半径 $|NF| = 9.2 \text{ mm}$; 屏蔽气质量流量 $g_0 = 0.0$ (无屏蔽气)、 0.093 、 0.186 、 0.279 或 0.372 g/s , 分别对应于屏蔽气流速 $u_0 = 0 \text{ m/s}$ 、 5 m/s 、 10 m/s 、 15 m/s 和 20 m/s 。屏蔽气体为 300 K 的纯氩。

数值模拟中采用的基本假定包括: 层流氩等离子体射流在空气环境中冲击平板; 流动是稳态、层流、轴对称的; 等离子体处于局域热力学平衡态; 等离子体光学薄。数值模拟中采用如下柱坐标系中的连续、动量、能量与组分守恒方程:

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

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

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

$$\frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v h)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) -$$

$$U_r - \frac{\partial}{\partial x} [(h_A - h_B) J_x] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(h_A - h_B) J_r] -$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k}{C_p} (h_A - h_B) \frac{\partial f_A}{\partial x} \right] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{k}{C_p} (h_A - h_B) \frac{\partial f_A}{\partial r} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u f_A)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v f_A)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_f \frac{\partial f_A}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_f \frac{\partial f_A}{\partial r} \right) + S_f \quad (5)$$

以上方程中 u 和 v 分别是轴向 (x -) 和径向 (r -) 速度分量, p 、 T 与 f_A 是压力、温度与氩的质量分数。 ρ 、 μ 、 k 、 h 、 C_p 与 U_r 分别是气体的密度、粘性系数、热导率、比焓、定压比热与单位体积等离子体的辐射功率, 它们都是温度与成分的函数。能量方程中含 $(h_A - h_B)$ 的项代表组分扩散对能量运输的贡献^[3], 其中 h_A 和 h_B 分别是纯氩和纯空气的比焓; J_x 和 J_r 分别是氩组分扩散质量通量向量 $\vec{J}_A = - (n^2/\rho) \bar{m}_A \bar{m}_B \bar{D}_{AB}^x \nabla X_A - \bar{D}_{AB}^T \nabla \ln T$ 的 x - 向和 r - 向分量, 这里 n 是气体中的总粒子数密度, \bar{m}_A 和 \bar{m}_B 分别是来自氩和空气的重粒子 (不包括电子) 的平均质量, X_A 是氩的摩尔分数, \bar{D}_{AB}^x 和 \bar{D}_{AB}^T 分别是组合寻常扩散系数和组合热扩散系数^[4]。输运系数 $\Gamma_f = [\bar{m}_A \bar{m}_B / (M \bar{M}_A)] \rho \bar{D}_{AB}^x$, 其中 \bar{M} 和 \bar{M}_A 分别是混合气体中所有粒子 (包括电子) 的平均质量和来自氩的所有粒子 (包括电子) 的平均质量^[4]。方程 (5) 中源项 S_f 包括了将氩组分的摩尔分数换算为质量分数时所引起的附加项^[3]。

计算时取 AB 处 $f_A = 1$, 速度和温度分布为 $u_{in} = U_0 [1 - (r/R_{in})^{1.4}]$ 及 $T_{in} = (T_0 - T_w) [1 - (r/R_{in})^{2.3}] + T_w$, 其中轴线处的最大值 $U_0 = 800 \text{ m/s}$ 及 $T_0 = 15000 \text{ K}$, T_w 是发生器出口内壁面的温度 ($T_w = 700 \text{ K}$)。 AL 处采用轴对称边界条件, 固体表面处采用零速度、零扩散通量、温度给定的条件, IJ 与 JK 处采用自由边界条件。

本文采用 SIMPLE 算法对控制方程组进行数值解。计算中采用了 $92 (x-) \times 187 (r-)$ 的网格系, 其中轴向 (x -) 网格均匀, 径向 (r -) 网格在轴线和屏蔽气出口附近加密。

3 数值模拟结果与讨论

我们在数值模拟中研究了屏蔽气体速度、屏蔽气体出口缝宽、基板到发生器出口的距离、有无遮盖罩等对碰撞射流特性的影响, 限于篇幅, 这里仅给出若干典型计算结果。

图 2 至图 4 比较了有屏蔽气与无屏蔽气情况下

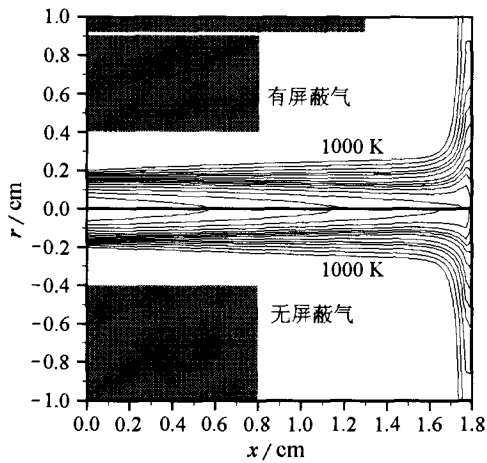


图 2 有 / 无屏蔽气时的温度分布 (间隔 1000 K)

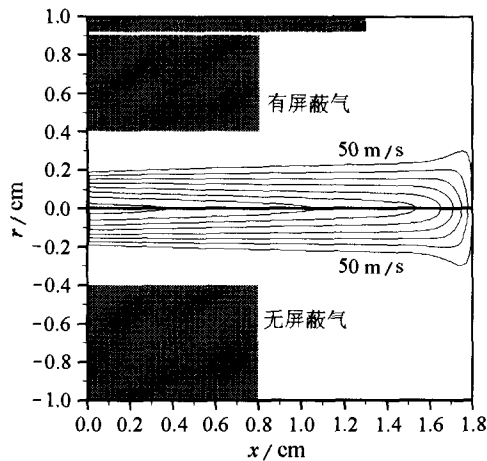


图 3 有 / 无屏蔽气时的轴向速度分布 (间隔 100 m/s)

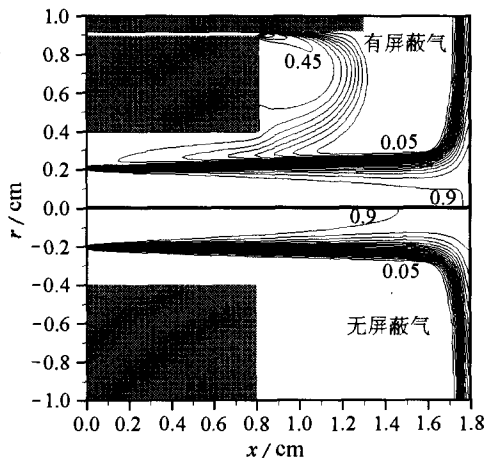


图 4 有 / 无屏蔽气时的氩质量分数分布 (间隔 0.05)

冲击射流中温度、轴向速度与氩质量分数分布的计算结果, 有屏蔽气时取屏蔽气速度 $u_0 = 5 \text{ m/s}$ 。由于有无遮盖罩对无屏蔽气时的计算结果影响不大, 图 2-4 的下半对无遮盖罩情形画出。可以看到, 屏蔽气的采用对射流中的浓度场有相当明显的影响, 对温度场有一些影响, 对速度场则影响不大。

对于屏蔽气流速 u_0 分别为 0、5、10、15 和 20 m/s 情形, 计算所得工件表面中心处的氧气质量分数 (由 $0.23 \times (1 - f_A)$ 计算), 分别为 2.76%、2.28%、2.18%、2.16% 和 2.16%。可见采用屏蔽气虽不能完全隔绝空气, 但的确能够对射流起屏蔽作用。屏蔽气体流速越大, 氧含量越少, 但并不是说屏蔽气的流速越大越好, 在流速大于一定数值 (如 10 m/s) 后进一步增加屏蔽气体速度不再能显著提高其“屏蔽”效果, 经济上也不合算。从本文的计算结果看, 对于层流氩等离子体射流材料加工而言, 屏蔽气的流量没有必要大于射流工作气体本身的流量, 这一点和湍流情况下^[5]很不一样。

5 结 论

本文采用数值模拟方法对具有同轴屏蔽气体保护的层流氩等离子体冲击射流特性进行了研究。发现屏蔽气体的确能在一定程度上降低射流中的氧含量, 但是在屏蔽气体的速度大到一定程度后, 继续提高速度不再能显著提高其“屏蔽”效果。

参 考 文 献

- [1] Fincke J R, Crawford D M, Snyder S C, et al. Entrainment in High-Velocity, High-Temperature Plasma Jets. Part I: Experimental Results. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2003, 46(22): 4201-4213
- [2] Pan Wenxia, Zhang Wenhua, Zhang Wenhong, et al. Generation of Long, Laminar Plasma Jets at Atmospheric Pressure and Effects of Flow Turbulence. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2001, 21(1): 23-35
- [3] Xu Dong-Yan, Chen Xi, Cheng Kai. Three-Dimensional Modeling of the Characteristics of Long Laminar Plasma Jets with Lateral Injection of Carrier Gas and Particulate Matter. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, 36(13): 1583-1594
- [4] Murphy A B. Diffusion in Equilibrium Mixtures of Ionized Gases. *Physical Review E*, 1993, 48(5): 3594-3603
- [5] Kang K D, Hong S H. Numerical Analysis of Shroud Gas Effect on Air Entrainment into Thermal Plasma Jet in Ambient Atmosphere of Normal Pressure. *J. Appl. Phys.*, 1999, 85(9): 6373-6380