

文章编号: 1001-0645(2007)06-0546-05

# 等离子喷涂过程中喷枪出口处基本参量的预测方法

范群波, 王鲁, 王富耻

(北京理工大学 材料科学与工程学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对典型的等离子喷涂工艺, 提出预测等离子喷枪出口基本参量的方法. 构建了输入功率的多元线性拟合数学模型, 实现了喷枪出口射流温度参量的求解. 根据气体状态方程, 计算出喷枪出口的射流速度. 计算结果与相关实验基本吻合, 并克服了传统方法的复杂性及不确定性.

**关键词:** 等离子喷涂; 能量守恒; 数值模拟

**中图分类号:** TG 174      **文献标识码:** A

## Prediction Methods of Basic Parameters at the Nozzle Exit in Plasma Spraying

FAN Qun-bo, WANG Lu, WANG Fu-chi

(School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A simple but efficient method is put forward to predict the basic parameters at the plasma gun nozzle exit, especially for typical Ar-He plasma spray processing. By measuring a serial of input powers and related currents, primary gas flow rates, as well as secondary gas flow rates, a linear mathematical model is established. Using the law of energy balance, the plasma temperature at the nozzle exit is calculated, and is further used to calculate the plasma velocity by solving the gas state equation. The results are in good agreement with experimental observations. The methodology adopted overcomes complexity and uncertainty of traditional methods, and are theoretically helpful for guiding the plasma spraying processing.

**Key words:** plasma spray; energy balance; numerical simulation

等离子喷涂过程中, 涂层的质量在很大程度上取决于颗粒在碰撞前的速度和它的熔化状态, 这就要求等离子体射流场是可控或可预测的. 但是, 由于等离子体发生器内部强烈的电磁、热及气体动力学相互作用和电极附近区域处理的复杂性<sup>[1-3]</sup>, 使得研究等离子体的形成已成为一项难度很大的工作. 同时, 由于喷枪出口处的温度高达上万度, 很难通过仪器精确测量, 所以更多情况下是根据经验人

为假定得到的, 因而导致计算误差. 虽然 Zhu Peiyuan 等人<sup>[4]</sup>建立了包括电弧柱区、阴极和阳极鞘层的数学模型, 将电极、鞘层和电弧作为一个整体来考虑, 但该模型必须知道阴极的电流密度分布. 该文献中所提出的近阴极区电流密度的分布形式, 存在着较大的不确定性.

作者采用能量守恒的方法, 并基于一定的实验数据, 建立了常规初始喷涂工艺参数(包括电流强

收稿日期: 2006-12-14

基金项目: 国家部委预研项目(9140A12020306BQ0117); 北京理工大学优秀青年教师基金资助项目(1040012040101)

作者简介: 范群波(1974-), 男, 博士, 讲师, E-mail: fanqunbo@bit.edu.cn.

©1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

度、气体流量等)与喷枪出口处射流基本物理量之间的定量关系,并在此基础上分析了输出功率分配情况及工艺参数的综合影响.

### 1 实验方法

采用美国 Praxair 公司制造的 SG100 等离子喷枪,对喷枪基本工艺参数(包括气体流量以及电流强度)与喷枪输入功率的关系进行了测量.主气为氩气(Ar),其流量范围为 0.9~3.6 m<sup>3</sup>/h;次气为氦气(He),其流量范围为 0~0.6 m<sup>3</sup>/h.电流强度范围为 500~900 A,系统电压范围为 30~40 V.由于实验与喷涂颗粒无关,所以测试过程中未送入粉末,但仍然通入了氦气作为载气,以符合实际工况条件,并起到冷却送粉管的作用.载气流量为 0.37 m<sup>3</sup>/h.测试过程中,主、次气流量与电流强度是可控的,而电压则可能随这 3 个基本工艺参数的改变而发生改变.

### 2 数学模型

等离子喷涂过程中,虽然等离子体发生器内部将产生非常复杂的物理变化和化学反应,但仍满足能量守恒定律<sup>[5-7]</sup>.

#### 2.1 能量守恒方程与输入功率

对于等离子发生器而言,输入的电功率  $P_{in}$  与消耗的功率在数值上是相等的.消耗的功率即输出功率,主要包括冷却水带走的热功率  $P_w$ 、气体的受热功率  $P_h$  以及气体发生化学反应进行电离(或分解)的功率  $P_i$ .故总的输入电功率为

$$P_{in} = P_w + P_h + P_i = IU. \quad (1)$$

式中: $I$  为电流强度; $U$  为电压.

由于在等离子喷涂过程中,所形成的非转移电弧的伏安特性是下降的,使得电压不可控,所以在喷涂过程中,实际上常常是通过改变电流强度和主气流量  $q_{Ar}$ 、次气流量  $q_{He}$  来控制输入功率.图 1~图 3 分别为通过实验测得的电流强度、主气流量以及次气流量与  $P_{in}$  的关系.

图 1 表示了在不同 He 流量条件下,保持  $q_{Ar} = 3.4 \text{ m}^3/\text{h}$  不变,电流强度从 500~900 A 连续变化时输入功率的变化情况.图 2 为不同电流强度条件下(500~900 A),保持  $q_{He} = 0.28 \text{ m}^3/\text{h}$  不变, $q_{Ar}$  从 0.9~3.6 m<sup>3</sup> 连续变化时  $P_{in}$  的变化情况.图 3 表示了在不同电流强度条件下(500~900 A),保持  $q_{Ar} =$

3.4 m<sup>3</sup>/h 不变,  $q_{He}$  从 0~0.6 m<sup>3</sup> 连续变化时  $P_{in}$  的变化情况.

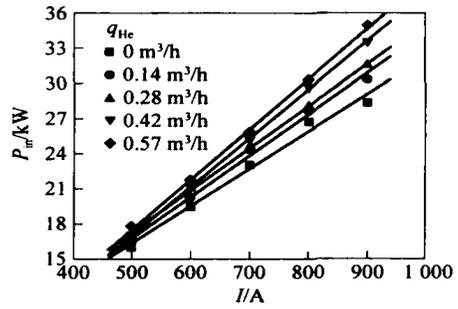


图 1 电流强度与输入功率的关系

Fig. 1 Relationship between plasma current and input power

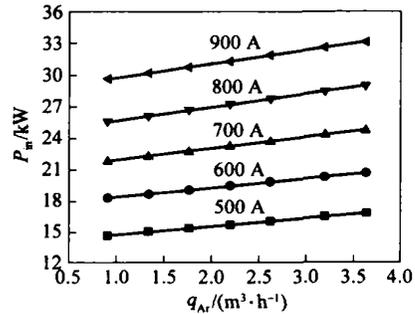


图 2 氩气流量与输入功率的关系( $q_{He} = 0.28 \text{ m}^3/\text{h}$ )

Fig. 2 Relationship between argon flow rate and input power ( $q_{He} = 0.28 \text{ m}^3/\text{h}$ )

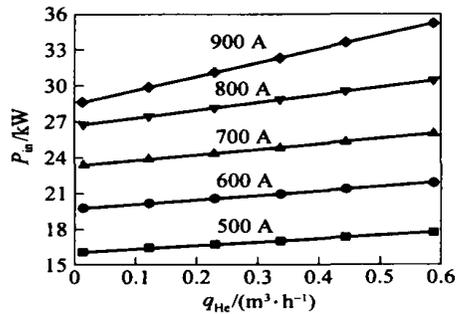


图 3 氦气流量与输入功率的关系( $q_{Ar} = 3.4 \text{ m}^3/\text{h}$ )

Fig. 3 Relationship between helium flow rate and input power ( $q_{Ar} = 3.4 \text{ m}^3/\text{h}$ )

由图 1~图 3 可以发现,  $P_{in}$  与  $I$  近似成正比关系,且与  $q_{Ar}$  和  $q_{He}$  呈线性递增关系,因此可认为如下方程成立:

$$P_{in} = I(K_1 q_{Ar} + K_2 q_{He} + K_3), \quad (2)$$

式中  $K_1$ ,  $K_2$  和  $K_3$  均为常数.经多元线性回归拟合后,可得最佳拟合结果: $K_1 = 1.445 \text{ V} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,  $K_2 = 7.845 \text{ V} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,  $K_3 = 27.777 \text{ V}$ .图 4 比较了  $P_{in}$  的测量值  $P_{in-exp}$  与计算值  $P_{in-cal} = I(K_1 q_{Ar} +$

$K_2 q_{\text{He}} + K_3$ ), 各离散点拟合后的直线斜率接近于 1 (总误差小于 10%), 表明计算值与实验值基本吻合。

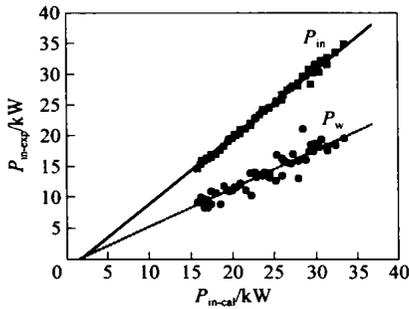


图 4 输入功率测量值、计算值以及  $P_w$  之间的关系

Fig. 4 Relationship between measured and calculated input powers and energy loss  $P_w$

## 2.2 冷却水带走的热功率

对于工业用等离子体, 可以看作是光学薄的介质, 即可以忽略等离子体的辐射. 因此等离子喷涂过程中, 损失的能量主要体现在冷却水带走的热量上, 表示为

$$P_w = C_{w,m} q_w (T_w - T_{w0}). \quad (3)$$

式中:  $C_{w,m} = 75.24 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ , 为水的摩尔热容;  $q_w$  为冷却水通过等离子喷枪的流量,  $\text{mol}/\text{s}$ ;  $T_w$  与  $T_{w0}$  分别为冷却水离开和进入喷枪时的温度.  $q_w$ ,  $T_w$  以及  $T_{w0}$  均可由实验测得. 图 4 比较了冷却水带走的热功率  $P_w$  与输入功率  $P_{in}$ , 计算结果表明  $P_w$  约占总输入功率的 56.6%, 因此可按下式计算:

$$P_w = 0.566 I (K_1 q_{\text{Ar}} + K_2 q_{\text{He}} + K_3). \quad (4)$$

## 2.3 气体的受热功率

当主气氩气和次气氦气组成的混合气体由室温  $T_r$  升高到温度  $T$  时, 气体的受热功率  $P_h$  为

$$P_h = \int_{T_r}^T (q_{\text{Ar}} C_{\text{Ar},m} + q_{\text{He}} C_{\text{He},m}) dT, \quad (5)$$

式中  $C_{\text{Ar},m}$  与  $C_{\text{He},m}$  分别为氩气和氦气的摩尔热容,  $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ . 在热等离子体的高温条件下, 气体的摩尔热容与普通条件下不同, 不再是常数值, 而是温度的函数. 文献[8]中给出了氩气的摩尔热容与温度的函数关系为

$$C_{\text{Ar},m} = 20.79 - 3.2 \times 10^{-5} T + 5.16 \times 10^{-8} T^2. \quad (6)$$

由于氦气在原组分气体中所占比例较小, 作者在计算过程中认为  $C_{\text{He},m} = C_{\text{Ar},m}$ [9].

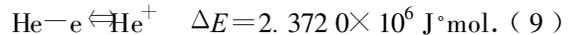
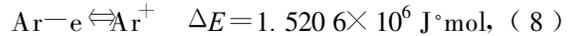
## 2.4 气体电离功率

等离子喷涂过程中, 在喷枪内部随着温度的急

剧升高, 单原子分子 Ar 与 He 将发生电离反应. 若用  $\alpha$  表示气体电离的程度, 则根据 Saha 气体高温电离平衡理论, 存在如下关系[7].

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = k p^{-1} T^{2.5} e^{-\Delta E/RT}. \quad (7)$$

式中:  $k$  为常数, 对于电离反应  $k = 0.032 \text{ Pa} \cdot \text{K}^{-2.5}$ ;  $p$  为等离子混合气体的压强, 由于生成的等离子在环境大气压下, 故  $p = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;  $R = 8.31 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})^{-1}$ , 为摩尔气体常数;  $\Delta E$  为气体电离能. 氩气与氦气的电离反应方程式为



由各气体的  $\alpha$  值, 可进一步计算出气体的电离功率  $P_i$

$$P_i = \alpha_{\text{Ar}} \Delta E_{\text{Ar}} q_{\text{Ar}} + \alpha_{\text{He}} \Delta E_{\text{He}} q_{\text{He}}. \quad (10)$$

式中:  $\Delta E_{\text{Ar}}$ ,  $\Delta E_{\text{He}}$  分别为氩气与氦气的电离能;  $\alpha_{\text{Ar}}$  与  $\alpha_{\text{He}}$  分别为氩气与氦气的电离度.

## 2.5 喷枪出口处基本参量的确定

由式(1)~(10)可知, 输入的电功率  $P_{in}$  可由式(2)进行预测; 冷却水带走的热功率  $P_w$  可由式(3)计算得到; 而由式(5)~(10)可知,  $P_h$  与  $P_i$  均为温度和气体流量的函数. 因此, 联立式(1)~(10), 通过逐次逼近迭代算法计算隐式方程, 输入电流强度及主次气流量, 即可计算出喷枪出口中心处的温度  $T_0$ . 将  $T_0$  代入式(7), 可进一步计算出喷枪出口处氩气及氦气的电离度  $\alpha_{\text{Ar}}$  和  $\alpha_{\text{He}}$ .

在喷枪出口处, 工质气体因体积剧烈膨胀而出现热力加速现象. 若气体各组分满足理想气体状态方程, 可进一步推算出喷枪出口中心处的速度为

$$v_0 = \frac{4RT_0(q_{\text{Ar}} + q_{\text{He}})}{\pi p D^2}, \quad (11)$$

式中  $D$  为喷嘴直径. 根据 Vardelle 等人的研究, 喷枪出口处气体的速度与温度分布可用方程表示为

$$v = v_0 \left[ 1 - \left( \frac{2r}{D} \right)^m \right], \quad (12)$$

$$T - T_w = (T_0 - T_w) \left[ 1 - \left( \frac{2r}{D} \right)^n \right]. \quad (13)$$

式中:  $m = 4.5$ ;  $n = 2.21$ ;  $v_0$ ,  $T_0$  分别为出口中心处的速度与温度;  $T_w$  为喷枪内壁处的温度;  $r$  为出口中心到喷枪内壁的径向距离.

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 喷枪出口处温度与速度的分布

根据式(12)(13), 若知道喷枪出口中心线上的

温度  $T_0$  与速度  $v_0$ , 便可计算出喷枪出口处的温度与速度分布. 图 5a 表示了  $I = 500 \text{ A}$ ,  $q_{\text{Ar}} = 1.98 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $D = 10 \text{ mm}$  工况条件下计算出的喷枪出口处的温度分布, 并与 Incropera 等人的实验结果<sup>[10]</sup>进行了对比; 图 5b 表示了  $I = 196 \text{ A}$ ,  $U =$

$30 \text{ V}$ ,  $q_{\text{Ar}} = 0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $D = 6 \text{ mm}$  工况条件下计算出的喷枪出口处的速度分布, 并与 Boffa 等人的实验结果<sup>[11]</sup>进行了对比. 结果表明, 计算值与实验值基本吻合, 喷枪出口处速度与温度的分布均趋向于抛物线形式.

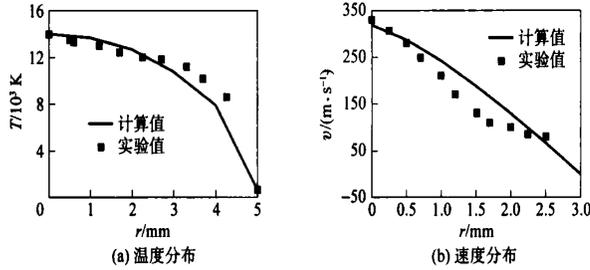


图 5 典型工况条件下, 喷枪出口的温度、速度分布

Fig. 5 Temperature and velocity profiles at the nozzle exit under typical operation conditions

### 3.2 输出功率的分配

如 2.1 节所述, 就等离子发生器而言, 输出功率包括冷却水带走的热功率、气体的受热功率以及气体发生化学反应进行电离(或分解)的功率. 当氩气-氦气为工质气体时, 对于受热功率, 又分为氩气的受热功率  $P_{h-\text{Ar}}$  和氦气的受热功率  $P_{h-\text{He}}$ ; 对于电离功率, 又分为氩气的电离功率  $P_{i-\text{Ar}}$  和氦气的电离

功率  $P_{i-\text{He}}$ . 图 6a, 图 6b 分别表示了两种典型工况下, 各功率的分配情况.

由图 6 可知, 在典型工况下, 除冷却水带走的功率均为 56.6% 外, 其余功率主要分配到主气氩气的受热上, 超过 30%; 其次是主气氩气的电离和次气氦气的受热, 两者之和不到 10%; 而氦气电离所消耗的功率  $P_{i-\text{He}}$  接近于 0, 故可认为氦气没发生电离.

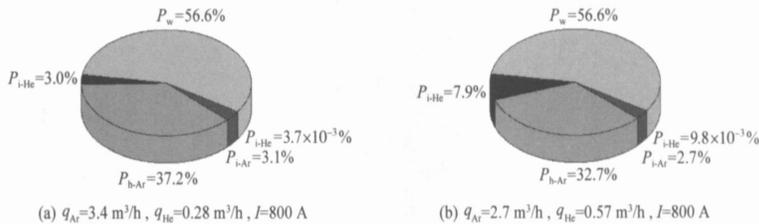


图 6 典型工况下, 各项输出功率的分配

Fig. 6 Output power distribution under typical operation conditions

### 3.3 工艺参数的综合影响及对工艺的优化作用

图 7a、图 7b 分别表示了电流强度与气体流量

对喷枪出口中心处温度  $T_0$  和速度  $v_0$  的综合影响, 图中氩气、氦气气体流量之比为 4:1.

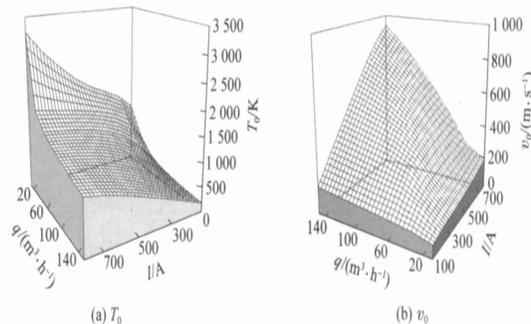


图 7 电流强度、气体流量对  $T_0$ 、 $v_0$  的综合影响

Fig. 7 Combined effect of plasma current and gas flow rate on  $T_0$  and  $v_0$

由图 7a, 图 7b 可见, 当其他参量保持不变时,  $I$  与  $P_{in}$  成正比关系; 随着  $I$  的增加,  $T_0$  及  $v_0$  均增加, 当  $I$  保持不变时, 随着单位时间内工质流量的增加, 单位体积内参与化学反应以及受热升温的原子数目也随之增多, 而总的输入功率增加不大. 所以随着气体总流量的增加,  $T_0$  降低,  $v_0$  增加. 在实际喷涂过程中, 可利用类似图 7 的模拟结果, 根据需要的温度、速度来逆向选择和设置电流强度与气体流量, 实现工艺优化, 起到指导实际生产的作用.

## 4 结 论

从等离子喷涂基本工艺参数出发, 包括电流、工质气体流量, 建立了求解等离子喷枪出口温度、速度以及气体电离度等基本参量的数值计算方法. 结合喷嘴形状计算了出口温度及速度的分布状况, 并与相关实验数据基本吻合. 分析表明: 典型工况下, 等离子喷枪输出功率的分配主要是冷却水的受热, 约占 56.6%, 其次是主气的受热, 超过 30%. 在其他条件保持不变的条件下, 随着电流强度的增加, 喷枪出口处的温度、速度均增加. 随着工质气体流量的增加, 喷枪出口的速度增加, 而温度则呈下降趋势. 因此可根据电流强度与气体流量综合影响三维图选择适当的工艺参数.

### 参考文献:

- [ 1 ] 苏炳志. 热等离子体的通道流动与传热[ D ]. 北京: 清华大学工程力学系, 1995.  
Su Bingzhi. Channel flow and heat transfer in thermal plasma[ D ]. Beijing: Department of Mechanics Tsinghua University, 1995. (in Chinese)
- [ 2 ] 俞岚. 直流电弧等离子体发生器和射流的数值模拟 [ D ]. 北京: 清华大学工程力学系, 1997.  
Yu Lan. Numerical simulation of DC plasma torch and plasma jet [ D ]. Beijing: Department of Mechanics Tsinghua University, 1997. (in Chinese)
- [ 3 ] Katashi Osaki, Osamu Fukumasa, Satoru Fujimoto, et al. Plasma electrode-type plasma spray gun-effect of powder loading on the behavior of plasma jet [ J ]. Vacuum, 2002, 65: 305—309.
- [ 4 ] Zhu Peiyuan, Lowke J J, Morrow R. A unified theory of free burning arcs cathode sheaths and cathodes [ J ]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1992, 25: 1221—1230.
- [ 5 ] Leylavergne M, Vardelle A, Dussoubs B. Comparison of plasma-sprayed coatings produced in argon or nitrogen atmosphere [ J ]. Journal of Thermal Spray Technology, 1998, 7(4): 527—536.
- [ 6 ] Dussoubs B, Fauchais P, Vardelle A, et al. Computational analysis of a three-dimensional plasma spray jet [ C ] // Proceedings X X III International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Toulouse France: [ s. n. ], 1997: 158—159.
- [ 7 ] Zhao Y Y, Grant P S, Cantor B. Modelling and experimental analysis of vacuum plasma spraying. Part I: Prediction of initial plasma properties at plasma gun exit [ J ]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2000, 8(4): 497—513.
- [ 8 ] Reid R C, Prausnitz J M, Sherwood T K. The properties of gases and liquids [ M ]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1987.
- [ 9 ] Barrow G M. Physical chemistry [ M ]. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [ 10 ] Incropera F P, Leppert G. Investigation of arc jet temperature measurement techniques [ J ]. ISA Transactions, 1967, 6(1): 35—41.
- [ 11 ] Boffa C V, Pfender E. Enthalpy probe and spectrometric studies in an argon plasma jet, HTLTR No. 73 [ R ]. Minnesota: University of Minnesota, 1969.

(责任编辑: 赵业玲)