

文章编号: 1001-1455(2008)01-0023-05

电磁加速等离子体喷涂技术的原理分析*

刘静静, 刘宗德

(华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 对自行研制的电磁加速等离子体喷涂技术(Electromagnetically accelerated plasma spraying, EMAPS)从原理上进行了分析,建立了等离子体的运动方程,得到了脉冲电流作用下等离子体上任一点的磁感应强度的计算公式和等离子体及它所压缩周围空气的速度表达式;并分析了粉末粒子与冲击波的相互作用,得到了粉末粒子的喷涂速度与喷枪长度、粉末粒子直径以及电流强度之间的关系;同时还对喷枪的长度进行了设计。

关键词: 爆炸力学;电磁加速等离子体喷涂;冲击波;等离子体电极

中图分类号: O389;O539

国标学科代码: 130·3520

文献标志码: A

1 引言

传统热喷涂技术由于喷涂粒子速度一般小于 1 km/s,涂层与基体为机械结合或半冶金结合,结合强度一般仅为数 10 MPa,涂层的结合强度、孔隙率、韧性等指标还不能完全满足现代工业及国防的需要。已有的研究表明,对于制备合金及金属陶瓷涂层而言,只有将粒子的速度提高到 2 km/s 以上,才能使涂层与基体达到冶金结合。R. C. Zowarka 等^[1-3]开展了基于电磁轨道炮原理的电磁加速等离子体喷涂(Electromagnetically accelerated plasma spraying, EMAPS)技术的研究,该技术利用氩气形成等离子体电极,等离子体受到轨道产生的电磁力(即洛伦兹力)的作用而高速前进,并压缩周围的气体形成冲击波,当冲击波扫过粉末粒子时,便把冲击波所携带的动能和热能传递给粉末粒子,使之高速喷涂到基体上形成高结合强度、低孔隙率等性能优良的涂层。实验中脉冲电流的强度为 160 kA,冲击波前沿的速度为 4.2 km/s,粉末粒子的速度达到了 2.1 km/s。J. Kitamura 等^[4-5]也利用研制的电磁加速等离子体喷涂技术制备了 B₄C 涂层,其单次喷涂涂层的厚度为 1.6 μm。刘宗德等^[6]利用自行研制的电磁加速等离子体喷涂装置制备出了 B₄C 涂层,其单次喷涂涂层的厚度为 11~12 μm。

与传统热喷涂技术相比较,EMAPS 技术具有如下优点:(1)利用喷枪内等离子体电极的加速运动推动喷涂粉末高速运动,可使粉末速度加速到高于 2 km/s,从而显著提高涂层与基体的结合强度;(2)可喷涂各种高熔点陶瓷粉末或合金粉末;(3)由于单次喷涂的涂层厚度小于 15 μm,可使涂层在基体的自激冷作用下快速凝固而形成亚微米晶或纳米晶涂层,从而显著提高了涂层材料的强度和韧性。

本文中对电磁加速等离子体喷涂的原理上进行分析,建立等离子体的运动方程,得到脉冲电流作用下等离子体上任一点的磁感应强度的计算公式和等离子体及其所压缩周围空气的速度表达式;并分析粉末粒子与冲击波的相互作用,得到粉末粒子的最大喷涂速度;同时还对喷枪的长度进行设计。

2 实验原理析

电磁加速等离子体喷涂系统由冲击大电流装置和电磁加速等离子体喷枪 2 部分组成,其原理如图 1 所示,冲击大电流装置由高压电容器组、三电极开关、触发装置、放电回路组成。Rogowski 环可以测量通过等离子体电极的电流强度,电磁加速等离子体喷枪的 2 个电极分别与放电回路的高、低压侧连

* 收稿日期: 2006-06-29; 修回日期: 2006-09-29

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划基金项目(NCET-04-0248);教育部重点基金项目(106053)

作者简介: 刘静静(1972—),女,博士研究生,讲师。

接,喷枪根部的上下电极由一根细金属丝导通。当粉末由送粉装置送入喷枪时,通过触发装置使隔离开关导通,从而使高压电容器放电,喷枪内由于金属丝短路发生电爆炸,并使上下极板间的空气击穿,产生等离子体和脉冲强电磁场,高温、高压等离子体电极在电磁力(即洛伦兹力)的作用下高速前进,并压缩周围的气体形成冲击波,当冲击波扫过粉末粒子时,便把冲击波所携带的动能和热能传递给粉末粒子,在枪膛的导向作用下,使之高速喷涂到工件表面。喷涂实验在大气氛围和室温条件下进行,正负极板间距为 10 mm,正负极板间距和喷枪长度均可根据喷涂条件作相应的调整。

为了简化计算,作出如下假设:(1)磁场为一维的;(2)等离子体电极为集中质量(片)。

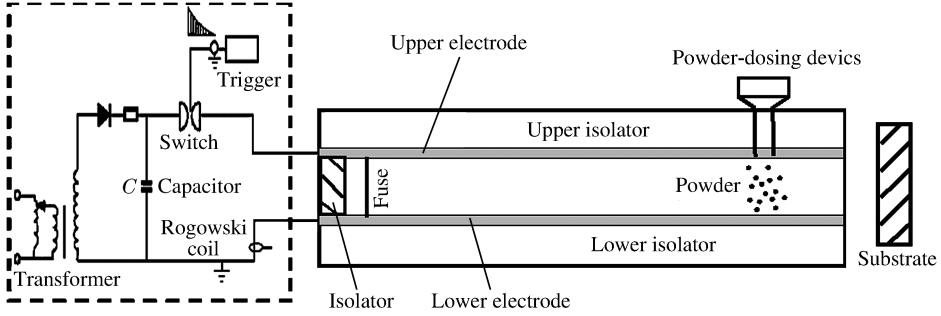


图 1 电磁加速等离子体喷涂实验装置原理图

Fig. 1 Diagram of an experimental setup for electromagnetically accelerated plasma spraying

2.1 等离子体电板上任一点磁感应强度的确定

图 2 为 EMAPS 系统的原理图,当高压电容器放电,喷枪内上下极板间的空气被击穿时,上下极板间形成一层很薄的平面等离子体。上下极板间距为 h ,两极板宽均为 b ,并假设电流密度沿电极板宽度均匀分布。为了分析等离子体电极的移动速度,首先分析该平面等离子体上任一点的磁感应强度 B 。

在电极板上 z_1 处取宽为 dz_1 的一电流元 $\mathbf{J}_1 = (I/b)dz_1\mathbf{i}$,上极板电流元在在平面等离子体上任一点 $P(x, y, z)$ 产生的磁感应强度

$$d\mathbf{B}_1 = \frac{\mu}{4\pi} \frac{J_1 dx_1}{S_1^2} \times \frac{\mathbf{S}_1}{S_1} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{S}_1 = (x - x_1)\mathbf{i} + (y - h)\mathbf{j} + (z - z_1)\mathbf{k}$, $dx_1 = dx_1\mathbf{i}$ 。所以式(1)可以写为

$$d\mathbf{B}_1 = \frac{\mu J_1}{4\pi} \frac{-(z - z_1)\mathbf{j} + (y - h)\mathbf{k}}{[(x - x_1)^2 + (y - h)^2 + (z - z_1)^2]^{2/3}} dx_1 \quad (2)$$

上极板电流元在平面等离子体上任一点 $P(x, y, z)$ 处产生的磁感应强度

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_1 &= \int_0^x \frac{\mu J_1}{4\pi} \frac{-(z - z_1)\mathbf{j} + (y - h)\mathbf{k}}{[(x - x_1)^2 + (y - h)^2 + (z - z_1)^2]^{2/3}} dx_1 \\ &= \int_0^z \int_0^x \frac{\mu I}{4\pi b} \frac{-(z - z_1)\mathbf{j} + (y - h)\mathbf{k}}{[(x - x_1)^2 + (y - h)^2 + (z - z_1)^2]^{2/3}} dx_1 dz_1 \end{aligned} \quad (3)$$

只有 z 方向的磁感应强度对等离子体电极的运动有作用,在 z 方向积分得

$$B_{1z} = \frac{\mu I}{4\pi b} \left(\arctan \frac{z}{h - y} + \arctan \frac{b - z}{h - y} \right) \quad (4)$$

同理,下极板在平面等离子体上点 $P(x, y, z)$ 处产生的磁感应强度在 z 方向的分量

$$B_{2z} = \frac{\mu I}{4\pi b} \left(\arctan \frac{z}{y} + \arctan \frac{b - z}{y} \right) \quad (5)$$

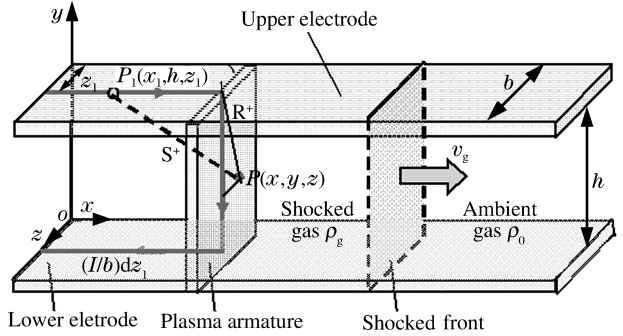


图 2 EMAPS 系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of EMAPS system

所以,两极板在平面等离子体上点 $P(x, y, z)$ 处产生的磁感应强度在 z 方向的分量

$$B_z = B_{1z} + B_{2z} = \frac{\mu I}{4\pi b} \left(\arctan \frac{z}{h-y} + \arctan \frac{b-z}{h-y} + \arctan \frac{z}{y} + \arctan \frac{b-z}{y} \right) \quad (6)$$

2.2 等离子体电枢及它所压缩的空气中的速度的确定

如图 2 所示,等离子体电枢在洛伦兹力的作用下沿 x 轴正方向前进,同时压缩周围的空气形成冲击波,选等离子体电枢与被压缩的空气为一系统,其运动方程为 $\frac{d(Mv_g)}{dt} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} = \int_0^h \int_0^b \frac{I}{b} B_z dz dy \mathbf{i}$, 即

$$\frac{d(Mv_g)}{dt} = \frac{\mu I^2}{4\pi} \left[\frac{4h}{b} \arctan \frac{b}{h} + \ln \left(1 + \frac{h^2}{b^2} \right) - \frac{h^2}{b^2} \ln \left(1 + \frac{b^2}{h^2} \right) \right] \quad (7)$$

式中: M 为等离子体电枢及其所压缩的空气质量, $M = M_A + \rho_0 AX$, M_A 为等离子体电枢的质量, ρ_0 为周围空气的密度, A 为喷枪内的横截面积; v_g 为等离子体电枢及其所压缩的空气中的速度, $v_g = dX/dt$; I 为脉冲电流的电流强度,由示波器在实验中实测得到,并拟合为 $I = I_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t)$ 。

在式(7)中,令

$$f\left(\frac{b}{h}\right) = \frac{\mu}{4\pi} \left[\frac{4h}{b} \arctan \frac{b}{h} + \ln \left(1 + \frac{h^2}{b^2} \right) - \frac{h^2}{b^2} \ln \left(1 + \frac{b^2}{h^2} \right) \right] \quad (8)$$

从式(8)中可以看出, $f(b/h)$ 是 b/h 的函数,图 3 是 $f(b/h)$ 与 b/h 的关系曲线。式(7)可化为

$$d(Mv_g)/dt = f(b, h) I_0^2 e^{-2\beta t} \sin^2(\omega t) \quad (9)$$

解式(9),可得

$$Mv_g = \frac{f(b, h) I_0^2}{2} \left[\frac{1 - e^{-2\beta t}}{2\beta} - \frac{2\beta(1 - e^{-2\beta t}) + 2\omega e^{-2\beta t} \sin(2\omega t)}{4\beta^2 + 4\omega^2} \right] \quad (10)$$

由于 $1 - e^{-2\beta t} \approx 2\beta t$, 且式(10)中的第二项相对于第一项可以忽略,所以式(10)可以简化为

$$Mv_g = f(b, h) I_0^2 t / 2 \quad (11)$$

把 $M = M_A + \rho_0 AX$ 、 $v_g = dX/dt$ 两式带入式(11),可得

$$2\rho_0 AX^2 + 4M_A X = f(b, h) I_0^2 t^2 \quad (12)$$

解式(12),得

$$X = \sqrt{X_A^2 + \frac{f(b, h) I_0^2 t^2}{2\rho_0 A}} - X_A \quad (13)$$

式中: $X_A = M_A / (\rho_0 A)$ 。从式(13)中可看出,等离子体电枢及它所压缩的空气很快达到一极限速度

$$v_g = I_0 \sqrt{f(b, h) / (2\rho_0 A)} \quad (14)$$

从式(14)可看出,等离子体电枢及它压缩的空气中的极限速度 v_g 不仅与脉冲电流的电流强度 I_0 成正比,而且与两电极板的宽度 b 、两电极板间距 h 有关。

由于在喷枪管内产生的是强冲击波,被压缩气体的密度可由下式确定

$$\rho_g / \rho_0 = (\gamma + 1) / (\gamma - 1) \quad (15)$$

式中: ρ_g 为被压缩气体的密度, $\gamma = 1.4$ 为空气的绝热指数。

2.3 粉末粒子喷涂速度的确定

为了确定粉末粒子的喷涂速度,首先假设粉末粒子为固体圆球状,其直径为 D_p ,密度为 ρ_p ,与粉末粒子相作用的冲击波的密度为 ρ_g ,速度为 v_g 。粉末粒子的运动方程^[7]为

$$M_p dv_p / dt = C_D \rho_g S_p (v_g - v_p)^2 / 2 \quad (16)$$

式中: M_p 为粉末粒子的质量, $M_p = \rho_p D_p^3 \pi / 6$; v_p 为粉末粒子的速度; C_D 为粉末粒子的阻力因数; ρ_g 为被压缩气体的密度; S_p 为粉末粒子的横截面面积, $S_p = D_p^2 \pi / 4$ 。

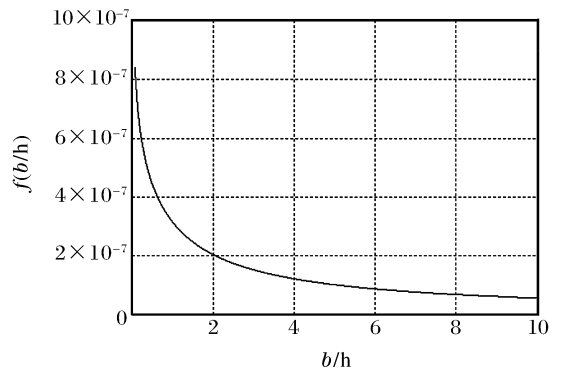


图 3 $f(b/h)$ 与 b/h 的关系曲线

Fig. 3 $f(b/h)$ versus b/h

为了得到粉末粒子的速度 v_p 与加速粉末粒子所需要的枪管长度 x_p 之间的关系,把式(16)变为

$$\frac{dv_p}{v_g - v_p} = \frac{1}{2} C_D \rho_g \frac{S_p}{M_p} dx_p \tag{17}$$

式中: $dx_p = (v_g - v_p)dt$, 为加速粉末粒子所需要的枪管长度。解式(17),得到

$$v_p/v_g = 1 - \exp[-(3/4)C_D(\rho_g/\rho_p)(1/D_p)x_p] \tag{18}$$

2.4 计算实例

实验在室温、空气条件下进行,空气密度 $\rho_0 = 1.293 \text{ kg/m}^3$, 电极板宽度 $b = 2 \text{ cm}$, 两电极板间距 $h = 1 \text{ cm}$, 喷枪的横截面积 $A = 2 \text{ cm}^2$ 。喷涂的粉末为 B_1C 粉末,其密度 $\rho_p = 2.52 \text{ t/m}^3$, B_1C 粉末粒子的直径 $D_p = 50 \text{ }\mu\text{m}$ 。对于马赫数大于 1 的冲击波,粉末粒子的阻力因数 $C_D \approx 1.0^{[8]}$ 。图 4 为用示波器在实验中实测得到的电流强度的曲线,拟合为公式 $I = 6.0 \times 10^4 \exp(-1.9 \times 10^3 t) \sin(5 \times 10^3 \pi t)$, 即 $I_0 = 6.0 \times 10^4 \text{ A}$, $\beta = 1.9 \times 10^3$, $\omega = 1.5 \times 10^3 \pi$ 。由公式(14)可以得到离子体电枢及它所压缩的空氣的极限速度 $v_g = 1.2 \text{ km/s}$,图 5 为加速粉末粒子所需要的枪管长度 x_p 与 v_p/v_g 的关系曲线。从图 5 中可以看出,当加速粉末粒子所需要的枪管长度 $x_p = 10 \text{ cm}$ 时, $v_p/v_g \approx 0.99$, 即加速粉末粒子的喷涂速度 $v_p \approx v_g = 1.2 \text{ km/s}$ 。

由公式(15)可知,冲击波的压缩比 $\rho_g/\rho_0 = (\gamma + 1)/(\gamma - 1) \approx 6$,所以形成冲击波所需要的枪管的长度 $x_g = 6x_p = 60 \text{ cm}$,所以枪管的总长度 $l_{\text{gun}} = x_g + x_p = 70 \text{ cm}$ 。由公式(18)中可以看出,粉末粒子的喷涂速度 v_p 与粉末粒子的直径有关,图 6 为当 $l_{\text{gun}} = 70 \text{ cm}$ (其他参数同上)时粉末粒子的喷涂速度 v_p 与粉末粒子的直径 D_p 间的关系曲线。由公式(14)和公式(18)可以得到在不同喷枪长度下粉末粒子的喷涂速度 v_p 与电流 I_0 的关系,如图 7 所示。

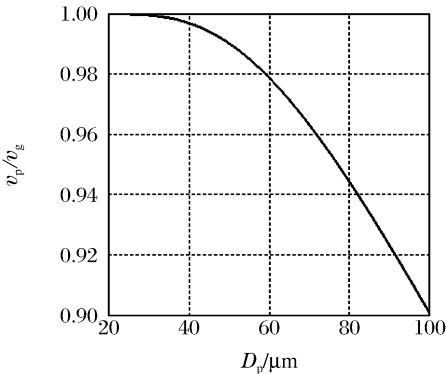


图 6 粉末粒子的速度与其直径的关系

Fig. 6 Powder particle velocity versus its diameter

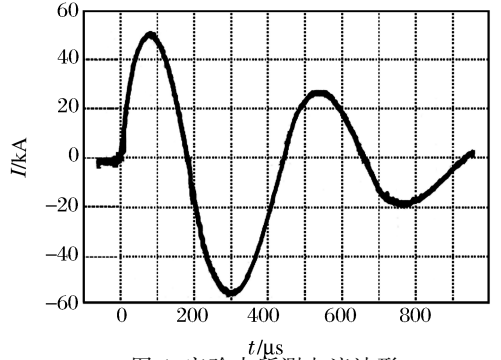


图 4 实验中所测电流波形

Fig. 4 Current measured in the experiment

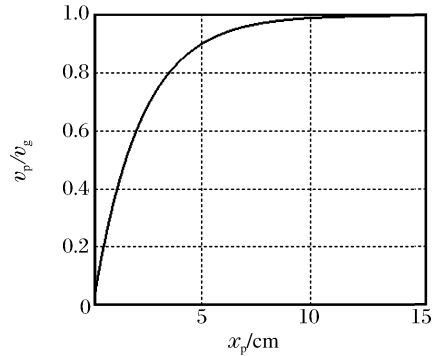


图 5 粉末粒子的速度与加速粉末粒子所需要的喷枪长度的关系

Fig. 5 Powder particle velocity versus gun length needed to accelerate powder particle

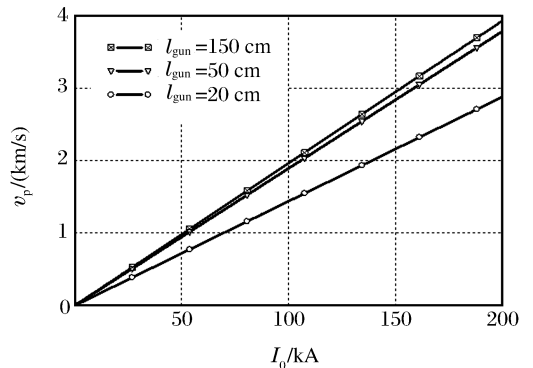


图 7 粉末粒子的速度与电流 I_0 的关系

Fig. 7 Powder particle velocity versus current

3 结论与展望

对自行研制的电磁加速等离子体喷涂技术从原理上进行了分析,建立了等离子体的运动方程,得到了脉冲电流作用下等离子体上任一点的磁感应强度的计算公式和等离子体及它压缩的周围空气的速度

表达式;并分析了粉末粒子与冲击波的相互作用,得到粉末粒子的最大喷涂速度为 1.2 km/s;同时还对喷枪长度进行了设计。计算结果对电磁加速等离子体喷枪的设计有指导意义。对电磁加速等离子体喷涂技术的研究还处于起步阶段,进一步的工作还有:(1)对模型进一步修正,如等离子体电极应是一段服从磁流体力学运动方程组的导电气体柱;对磁场进行三维描述;考虑枪管的气流附面层与冲击波的相互作用等。(2)改进等离子体发生装置,使之产生稳定的等离子体。(3)测量等离子体的温度、速度以及提高喷涂效率等以便于商业生产,使之创造更大的社会效益。

参考文献:

- [1] Uryukov B A, Gasin D A. Application of coatings using pulsed plasma flows[J]. Surface and Coatings Technology, 1991,48(1):7-11.
- [2] Zowarka R C, Uglum J R, Bacon J L, et al. Electromagnetic powder deposition experiments[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999,35(1):268-273.
- [3] Bacon J L, Davis D G, Polizzi R L, et al. A new electromagnetic powder deposition system[C]//United Thermal Spray Conference. Indianapolis, Indiana: ASM International, Materials Park, Ohio, USA. 1997:393-397.
- [4] Kitamura J, Usuba S, Kakudate Y, et al. Formation of boron carbide coating by electromagnetically accelerated plasma spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2003,169/170:324-327.
- [5] Kitamura J, Usuba S, Kakudate Y, et al. Structure and mechanical properties of boron carbide coatings formed by electromagnetically accelerated plasma spraying[J]. Diamond and Related Materials, 2003,12(10/11):1891-1896.
- [6] 刘宗德,陈蕴博,刘静静,等.电磁加速等离子喷涂法制备碳化硼涂层初步分析[J].材料热处理学报,2005,26(5):49-51.
LIU Zong-de, CHENG Yun-bo, LIU Jing-jing, et al. Experimental study on boron carbide coating prepared by electromagnetically accelerated plasma spraying[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005,26(5):49-51.
- [7] Дресвин С В.低温等离子体物理及技术[M].唐福林,译.北京:科学出版社,1980:370-371.
- [8] Schlichting H. Boundary Layer Theory[M]. Fourth Edition. New York, NK: McGraw-Hill Book Company. 1960.

Theoretical analysis of the electromagnetically accelerated plasma spraying

LIU Jing-jing^{*}, LIU Zong-de

(Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Theoretical analysis of the electromagnetically accelerated plasma spraying (EMAPS for short) developed was carried out. Governing equations of the plasma under dynamic loading conditions were derived. Expressions of flux density of one point on the plasma and the velocity of the plasma armature and the compressed gas were obtained. Interrelation of the shock and the powder particles were analyzed, and relationships between powder velocity and its diameter, the length of the barrel and the current intensity were given. The length of the gun system was determined. Analysis results can give guidance in design of the EMAPS system.

Key words: mechanics of explosion; electromagnetically accelerated plasma spraying; shock wave; plasma armature

* Corresponding author: LIU Jing-jing

E-mail address: liujingjing900@163.com.cn

Telephone: 86-10-80798646