

大气压层流等离子体射流特性及其用于材料表面处理的效果

潘文霞, 张文宏, 张文华, 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要:在大气压条件下产生出能量衰减慢且分布均匀、噪音小的氩和氮氩混合气的层流等离子体射流。与湍流等离子体射流相比,由于对周围冷气体卷吸减少,层流射流在喷射方向的长度可增长6倍。试验表明,只有采用结构合理的等离子枪,综合调控供气和电参数条件,抑制气流的脉动和抖动,才能形成层流等离子体射流。结合数值计算对等离子体气流温度分布的定性分析,说明层流情况下射流径向能量分布集中,轴向温度变化平缓,有利于材料表面处理的温度、处理区域和应力状态的控制。

关键词:层流等离子体射流;能量分布;温度梯度;材料表面处理

中图分类号:TM924.75 文献标识码:A 文章编号:0254-6051(2000)11-0038-03

Characteristics of Laminar-flow Plasma Jet at Atmospheric Pressure and Its Effectiveness Used for Material Surface Treatment

PAN Wen-xia, ZHANG Wen-hong, ZHANG Wen-hua, WU Cheng-kang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Laminar-flow plasma jet of favorable energy distribution and very low noise could be generated at atmospheric pressure with argon or a mixture of argon and nitrogen as the working gases. The laminar plasma jet showed a length of about 7 times than that of a turbulent one, because of the reduced air entrainment. Experimental results confirmed that the laminar plasma jet could only be generated by suppressing the flow surging and whipping with a reasonable torch structure under a set of well balanced gas feeding and power conditions. Simulated temperature distribution of plasma jet indicated that a laminar plasma jet has a relatively centralized energy distribution in its radial direction and greatly reduced temperature gradient in the axial direction. This could be favorable for the control of treatment temperature, region and stress conditions of material when the laminar jet is used for materials surface processing.

Key words: laminar-flow plasma jet; energy distribution; temperature gradient; materials surface treatment.

1 引言

大气压直流等离子体射流是一种高温高速的高能流密度气流,被广泛应用于材料合成、薄膜制备、喷涂和表面强化处理。一般用于材料加工的大气压直流等离子体可分为两类:一类是转移式,以被加工工件作为阳极^[1-3],因此,等离子枪出口与工件间的距离、工件材料的物理性能、表面形貌以及粗糙度、枪相对于工件的移动速度、工作电流等参数及其微小变化,都会明显影响等离子体状态和对材料表面的处理效果^[4];另一类是非转移式,等离子枪本身包含阴极和阳极,因此,等离子体射流的状态基本不受被加工工件条件的影响^[5-7]。但是,以往的非转移式等离子体射流流动的湍动性强,由于电弧弧根在等离子枪阳极通道内的不规则跳动,以及高速射流离开喷口处对周围静止冷气流的剪切作用,形成射流对周围气体的严重卷吸^[8],冷热气体掺混很快,从外观上表现为射流的高温区域长度很短,同时产生强烈的噪音。对这类射流特性的测定结果表明其弧电压的波动幅度很大^[9,10],也就是射流能量的波动幅度大,从而导致这种等离子体射流用于材料表面加工的工艺重复可控性很差。

过去,等离子体领域的研究者大多注重其产生过程与机制以及在航天方面的应用问题。而多数材料热处理领域的研究者使用等离子体,则主要从材料表面改性的需求出发,选择

已有的等离子体设备和技术,通过改变其外部可调参数,凭借经验摸索来控制处理工艺,很少考虑等离子体状态的稳定性及其内在作用因素对材料表面处理效果的影响。近年来,随着等离子体技术在材料制备与加工领域的广泛应用^[11],等离子体状态对材料加工稳定性和重复可控性的影响越来越引起了人们的注意,特别是等离子体气流的脉动性和湍流特征对喷涂过程中粉末颗粒均匀加热的影响,已成为影响涂层质量和工艺可重复性的重要因素^[7,8]。因此,不仅仅是被动地利用现有的工具,主动地根据材料加工技术的发展需求,产生特定的等离子体状态的研究具有重要的意义。

为了从根本上改变大气压等离子体用于材料表面处理的工艺稳定性和可重复性差的问题,本项研究通过新型等离子枪研制和工作参数的调整,产生出稳定性好、气流脉动小、能量衰减慢且分布均匀、噪音小的大气压层流等离子体射流,并以数值计算的方法对层流和湍流等离子体射流的温度分布进行了定性的分析,以探讨层流等离子体射流对提高材料表面处理效果的作用。

2 层流等离子体射流的产生

2.1 试验方法

采用了特定的等离子枪电弧通道结构,以限制电弧弧根在电动力和气动力的作用下沿阳极通道产生轴向跳动,抑制弧电压的大幅度波动而造成的等离子体射流气体能量的波动。图1为等离子枪的结构简图。枪的结构除了一般非转移式等离子枪所含有的阴极和阳极之外,在其间还夹有中间段。产生等离子体射流的主气由阴极和中间段的间隙供入,进气方式为轴向或切向,辅气由中间段与阳极的间隙供入,电弧通道的结构同时考虑了尽可能减少对气流的扰动。主气采用了

作者简介:潘文霞,女,42岁,研究员,博士。

基金项目:国家自然科学基金 19975064、中国科学院 95 重大 KJ951-1-20 项目和中国科学院力学研究所所长择优基金

收稿日期:2000-05-30

氩气、氮气,以及这两种气体的混合气,辅气可为氩气、氮气,以及其他多种反应性气体。产生层流等离子体射流的气体流量,一般为常规用于湍流等离子体射流的 1/3 或更少。用于产生等离子体的电源为具有良好输出稳定性的 15 kW 级直流电源。

用照相方法记录了不同条件下所产生的等离子体射流的外观,以测定弧电压和电流的波动并对应于射流的外观来判断气流的稳定性。

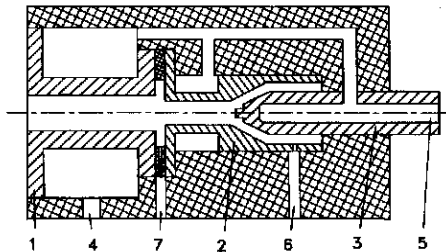


图 1 新型等离子枪的结构简图

1. 阴极 2. 中间段 3. 阳极 4. 进水 5. 出水
6. 主气入口 7. 辅气入口

Fig. 1 Schematic drawing of the new torch

1. cathode 2. inter-electrode insert 3. anode 4. water in
5. water out 6. main gas inlet 7. auxiliary gas inlet

2.2 试验结果

图 2 为大气压条件下所产生的两种氩氦混合气体的等离子体射流外观照片,产生两射流的输入功率都为约 9 kW。图 2a 所示射流的工作气体总流量为 25 L/min,射流状态为典型的湍流,对应的弧电压呈不规则的大幅度波动,说明电弧弧根的跳动和气流的脉动,同时伴随射流产生强烈的噪音;(b)是层流等离子体射流,工作气体流量为 10 L/min,对应着规则的代表电源特性的小幅度弧电压波动,射流产生的噪音低于电源的工作噪音。由图 2 可见,与湍流等离子体射流相比,层流射流在喷射方向的长度可能增长 6 倍,射流的高温区域长度与其直径之比约高达 45,而湍流射流所呈现的长径比值却很小。

在大气压条件下产生出图 2b 所示状态的层流等离子体射流,需要综合平衡和调整电源、供气方式与位置、气流量、等离子枪结构等各项参数。等离子体射流的产生是一个瞬时和极端条件下包括多因素复杂相互作用的过程,不少研究者对形成等离子体气流脉动和湍动的因素作了一些定性的分析研究^[7~10],指出:电弧弧根在等离子枪阳极通道内的跳动是形成气流脉动的主要原因;等离子体射流离开喷口处其高温高速气流对周围静止冷气体的剪切作用,是形成射流对周围气体严重卷吸、湍流状态迅速发展、射流能量衰减很快以及产生强烈噪音的主要原因。然而,能够控制弧根跳动和气流与各相关因素的作用效果,成功地产生出这种能量衰减慢和噪音小的层流等离子体射流的研究结果却很少^[12,13]。

3 等离子体射流温度分布与材料表面处理效果分析

采用在热等离子体状态的数值模拟方面应用最广的 SIMPLE 算法,在假设等离子体为光学薄、处于局域热力学平

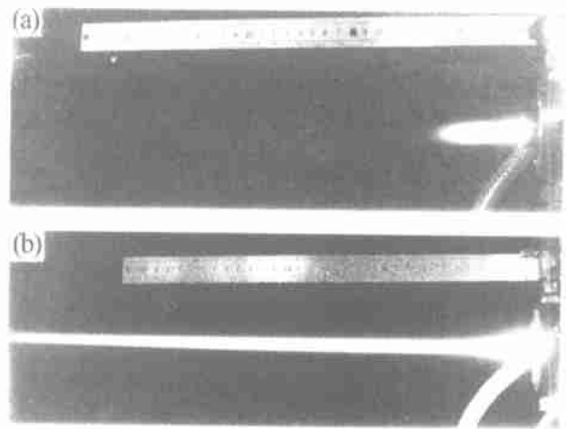


图 2 等离子体射流照片

- (a) 湍流 (b) 层流射流

Fig. 2 Plasma jet

- (a) turbulent (b) laminar-flow jet

衡状态、忽略重力影响的轴对称定常流动的条件下,对湍流和层流的氩等离子体射流的温度分布进行了模拟计算^[14],在此基础上分析了不同的等离子体射流状态对材料表面处理效果的影响。

图 3 为湍流和层流等离子体射流的温度分布图。可见湍流状态的等离子体射流沿其喷射方向的温度衰减很快,也就是射流的能量耗散很快。这大致对应了图 2a 的射流高温区域的外观照片,正是由于射流的湍流流动特性,决定了其离开喷口处对周围大气形成严重扰动和卷吸,使得射流周围的冷气体与其高温气流很快掺混,因而高温区域难以延伸^[8]。层流等离子体射流的温度分布计算结果也基本与试验观察结果(图 2b)有较好的对应。由于气流脉动性的减小及其特定的与周围冷气体的边界层的流动状态,有效控制了射流高温气体与周围冷气体的掺混,因而射流的能量衰减相应地减缓,得到了高温区域的径向扩散小、沿喷射方向的长度大幅度增长的射流形态。

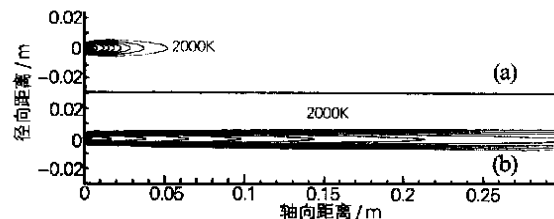


图 3 氩等离子体射流温度分布计算结果

- (a) 湍流 (b) 层流射流 各两线间温度差为 1000 K

Fig. 3 Simulated isotherms distribution of argon plasma jet

- (a) Turbulent (b) Laminar plasma jets Temperature difference between two near lines is 1000 K

图 4 为与图 3 对应的湍流和层流等离子体射流中心线上的温度变化的计算结果。可见湍流射流轴线上的温度梯度非常大,假定利用射流中心线上约 8000 K 的温度区域对工件表面进行热处理,即使不考虑射流自身有很强的脉动性,仅由于工件形貌、表面粗糙度、操作误差等原因,若使工件与等离子

枪喷口间距离产生约 2~3 mm 的波动,就可能形成工件表面附近的气体温度发生约 1000 K 的变化,这种情况明显不利于材料表面处理的工艺稳定性控制。与湍流射流相比,层流射流在轴线上的温度梯度十分平缓。若利用层流射流的相应温度区域对材料进行表面处理,在考虑相同的喷口与工件距离波动的情况下,材料表面附近气体温度的变化仅为数十摄氏度,相应地由此而形成的材料表面温度的波动则更小,这完全可满足一般材料的相变、半熔融或熔融表面处理的温度控制范围要求^[1,15]。因此,这种层流等离子体射流用于材料表面处理,将有利于从根本上改善处理工艺的稳定可控性。

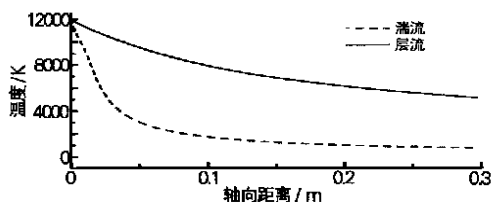


图 4 对应于图 3 所示两射流中心线上的温度变化
Fig. 4 Temperature changes along the axial direction of the two plasma jets in Fig. 3

图 5 为湍流和层流等离子体射流轴线上的温度为 8000 K 位置的径向温度分布的计算结果。湍流射流的径向高温区较层流射流明显增宽,这也正是湍流射流的高温气体与其周围冷气体混合充分发展的结果,这种等离子体射流不仅其能量分布状况不利于材料表面处理工艺的控制,而且周围杂质气体的掺入也将造成处理过程中材料氧化掺杂等问题。相比之下,层流射流的径向高温区域集中,也就是径向的能量分布主要集中于中心部分,说明射流与周围气体的混合少,这不仅有利于减轻材料氧化等问题,更有利于材料加工的加工区域和热影响区的控制,同时,也可能根据材料加工的实际需求,通过调节和控制等离子体射流的径向温度分布和相关的处理工艺参数,以调节材料表面热处理区域与其周边基材材料的界面和应力状况,提高材料表面热处理的工艺可控性和处理效果。

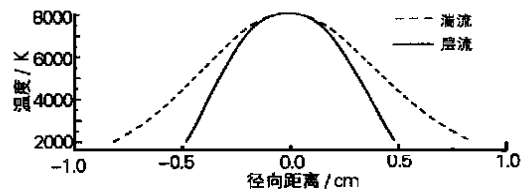


图 5 射流轴线上温度为 8000 K 处的径向温度分布
Fig. 5 Temperature distributions at radial direction with the central temperature of 8000 K

此外,在喷口附近的高温区域,湍流等离子体射流的气流速度很高,一般是层流等离子体的 3 倍以上。气流冲击物体时将根据其速度大小对物体表面产生相应高低的压力^[16],在物体表面存在液体的情况下,这会使流体严重变形以至飞散。因此,除上述湍流等离子体射流的气体温度分布等其它因素以外,其很高的气流速度也不适用于材料表面的融敷、半熔融或熔融再凝固处理。而气流速度低的层流等离子体射流用于喷涂涂层的后处理,已被证实可有效改善涂层的组织结构、涂

层与界面的接合、甚至于界面附近的基底组织^[13]。

4 结论

采用合理的等离子枪结构,综合平衡各项外部物理参数,在大气压条件下产生出了杂质气体掺混少、能量衰减慢、噪音小的层流等离子体射流。结合湍流和层流等离子体射流的气体温度分布的数值计算结果,对两种射流用于材料表面处理进行的分析表明:层流等离子体射流径向能量分布集中,轴向温度变化平缓,有利于材料表面处理的温度、处理区域、氧化掺杂和材料应力状态的控制。

参考文献:

- [1] AN M, ZHU W Z. Surface Treatment of 45 Steel by Plasma-Arc Melting[J]. Surf. & Coat. Tech., 1997, 91: 183-191.
- [2] Miyazaki T, Yoshioka S, Kimura T, Komatsu A, Kinoshita N. Surface Modification of Steel by a Small-Diameter Plasma Arc[J]. Annals of the CIRP, 1995, 44(1): 161-164.
- [3] Nitkiewicz Z, Jeziorski L. Plasma Heat Treatment of Steel: Microstructure, Properties and Applications[J]. Mater. Sci. & Eng., 1991, A140: 474-478.
- [4] Sobrino J M, Coudert J F, Fauchais P. Anodic Arc Root Behavior of a Transferred Arc Moving Orthogonally to a Plane Surface [C]. Proceedings of ISPC-12, 1995: 1455-1460.
- [5] 林化春, 丁润刚. 等离子体相比硬化处理后的残余应力及残余奥氏体[J]. 金属热处理, 1992, (5): 23-27.
- [6] Dublanche D, Coudert J F, Fauchais P. DC Plasma Jet Heating of a Rotating Cylinder: Modeling and Measuring [C]. Proceedings of ISPC-12, 1995: 1467-1474.
- [7] Fauchais P, Vardelle A, IEEE Trans. Plasma Sci. [J], 1997, 25: 1258.
- [8] Pfender E. Plasma Jet Behavior and Modeling Associated with the Plasma Spray Process [J]. Thin Solid Films, 1994, 238: 228-241.
- [9] Collares M P, Pfender E. Effects on Plasma Torch Efficiencies by Variation of the Power Connection to the Anode Nozzle [C]. Proceedings ISPC-13, 1997, Beijing: 161-166.
- [10] Duan Z, Wittmann K, Coudert J F, Effects of the Cold Gas Boundary Layer on Arc Fluctuations [C]. Proceedings ISPC-14, 1999, Prague: 233-238.
- [11] Pfender E. Thermal Plasma Technology: Where Do We Stand and Where Are We Going [J]. Plasma Chem. and Plasma Process., 1999, 19: 1-32.
- [12] Solonenko O P. State-of-the-Art of Thermophysical Fundamentals of Plasma [M]. Thermal Plasma and New Materials Technology, O P Solonenko and M F Zhukov, ed., 1995, 2: 493.
- [13] Kuz'min V I, Solonenko O P, Zhukov M F. Application of DC Plasma Torch with a Quasi-Laminar Jet Outflow [C]. Proceedings of 8th National Thermal Spray Conf., 1995, Houston: 83-88.
- [14] 张文华. 层流等离子体发生器的研究 [D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1999.
- [15] Tokmakov V P. Plasma Hardening of Cutting Tools [M]. Thermal Plasma and New Materials Technology, Solonenko O P and Zhukov, M F ed., 1995, 2.
- [16] ZHANG Wei-hong, PAN Wei-xia, WU Cheng-kang. Modeling of Laminar Plasma Jet Impinging on a Flatplate with Approximate Box Relaxation Method [J]. Plasma Science & Technology, 1999, 1(1): 73-78.