层流等离子体金属丝材喷涂工艺研究

吴广智[1,2],李　腾[1],潘文霞[1]

(1. 中国科学院　力学研究所,北京　100080;2. 中国科学院　研究生院,北京　100039)

摘要:利用层流等离子体射流,以普通工程铁丝为喷涂材料,在Q235基体表面制备金属涂层,并利用喷涂系统的参数可调性研究工艺参数对涂层质量的影响。结果表明,利用层流等离子体射流喷涂可以得到具有典型层状结构、氧化较少的致密涂层。

关键词:层流等离子体射流;送丝速度;工作气流量;氧化

中图分类号:TG174.442　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:0254-6051(2006)

Laminar Plasma Spraying of Metal Wire in Atmosphere

WU Guang-zhi[1,2], LI Teng[1], PAN Wen-xia[1]

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: An iron coating was prepared on a common steel substrate by laminar plasma spraying and the relationship between process parameters and the coating properties is investigated. The results show that the laminar plasma was feasible to be used to prepare metal coatings with less oxidation.

Key words: laminar plasma jet; feeding velocity; working gas flow; oxidation

工程中常用的湍流等离子体射流,由于气流脉动性强、对环境气体卷吸强烈,涂层质量难以控制,工艺重复性差,金属涂层氧化严重[1]。为了解决涂层的氧化问题,发展了真空喷涂和惰性气体屏蔽喷涂,但由于生产成本高,在工业领域没有大规模应用。近年来层流等离子体射流的产生和特性研究表明[2-3]:层流等离子体射流长度可调、速度和温度的轴向梯度小、气体脉动弱,对环境气体的卷吸掺混少。层流等离子体射流低压喷涂[4]和大气压熔凝[5]实验表明,层流等离子体射流作为高温热源可以增加喷涂材料(或熔覆材料)的加热时间及加热效果,涂层致密、均匀。

另一方面,等离子体喷涂材料来源广泛,形式多样。常用的粉末材料有一定的粒度分布,喷涂过程中难以实现均匀供粉和加热,不宜用于工艺可行性的机理研究。而对于易于拉拔成型的金属材料,利用丝材形式喷涂,材料在等离子体射流中可以达到完全熔化,熔滴被高速射流雾化、加速后撞击基材表面形成涂层。同时,这种喷涂方法还有利于提高喷涂材料的沉积效率和等离子体射流能量的利用率[6]。

本文主要研究大气压层流等离子体喷涂工艺,希望利用层流射流对环境空气卷吸少的特点,解决以往在大气环境中用湍流等离子体喷涂金属材料带来的严重氧化问题。实验以铁丝为喷涂材料,在Q235基体表面制备涂层,比较了供丝速度、射流工作气体流量、层流/湍流状态对喷涂涂层组织的影响。

1　试验材料与方法

喷涂材料为普通铁丝,直径 ϕ1.2 mm;基体为Q235碳素结构钢,样品直径 ϕ70 mm、厚3 mm。用线速度稳定、可重复,并且连续可调的送丝装置,将铁丝送入以直流非转移电弧方式产生的层流或湍流等离子体射流中,铁丝在射流中受热熔融、雾化、加速,撞击基体表面,沉积、凝固,形成涂层。

试验系统如图1所示。试验工况为:等离子体发生器工作气体为工业纯氩气,工作电流180 A;气流量 $2.1\times10^{-4}\sim4.0\times10^{-4}$ kg/s;送丝速度3~24 mm/s;喷涂距离100 mm。

喷涂前用丙酮清除基体表面油污,并用金刚砂砾进行喷砂处理,以利于涂层与基体的结合。喷涂结束后,采用线切割方式截取涂层样品,嵌置于环氧树脂中制成式样,经研磨、抛光后,利用金相显微镜及扫描电镜对涂层断面进行组织观察。

2　试验结果与讨论

2.1　层流与湍流等离子体射流及其喷涂状态

层流等离子体射流产生的噪声低于电源和换气装置的工作噪声,因此,不需要噪声防护措施。而湍流等离子体射流工作时产生强烈的噪声,经常超过100dB。同时,在层流等离子体射流不发生向湍流射流转变的工作区域内,射流高温区的长度随

作者简介:吴广智(1976.05—),女,河北衡水人,硕士研究生,主要从事层流等离子体喷涂工艺研究工作。联系电话:13611325507　E-mail:gzwu@mails.gscas.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(50336010;50276065)

收稿日期:2006-03-05

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

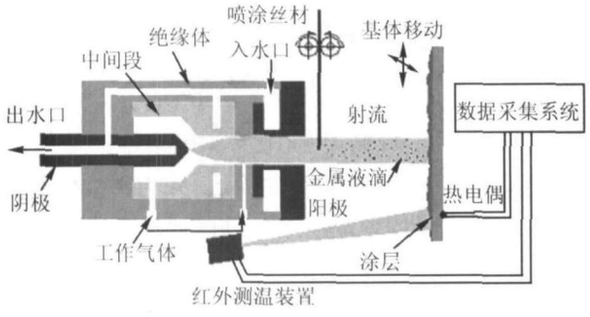

图1 喷涂试验系统示意图

Fig. 1 Schematic drawing of plasma spraying system

着气流量或弧电流的增加而增加，有很宽的工作参数调整区域[7]，对于合适的供丝速度等喷涂工艺参数有较宽的选择范围。通常在小气流量的条件下，射流速度较低，喷涂材料的雾化和加速不充分，很难得到好的涂层组织。在工作电流一定的情况下，宜选择较高气流量的层流射流喷涂条件制备涂层。图2所示为弧电流180A、工作气流量2.7×10^{-4}kg/s的层流射流和气流量4.0×10^{-4}kg/s的湍流射流，以及对应的同一供丝速度(20mm/s)的喷涂状态。

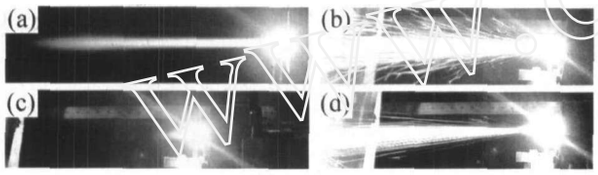

图2 层流与湍流等离子体射流及其喷涂状况

(a)层流等离子体射流 (b)层流等离子体喷涂

(c)湍流等离子体射流 (d)湍流等离子体喷涂

Fig. 2 Laminar and turbulent plasma jet and their spraying condition

(a) laminar plasma jet (b) laminar plasma jet spraying

(c) turbulent plasma jet (d) turbulent plasma spraying

2.2 送丝速度的影响

离开发生器出口以后，等离子体射流在出口中心具有最高温度和速度。试验采用的等离子体射流的中心最高温度约15000K，最高速度约800 m/s，射流高温区直径约ϕ5 mm。一定的射流条件下，当送丝速度低时，铁丝达到射流中心需要较长的时间，受热时间长，可能出现铁丝在射流边缘即已熔化的状况。试验结果表明，在送丝速度低于8mm/s时，铁丝完全在射流边缘熔化，不能被射流雾化，而是形成大的熔融液滴，在重力的作用下滴落；送丝速度为12～22mm/s，基本可以使铁丝在射流中熔融、雾化；继续增大送丝速度，会出现丝材穿越射流，熔断、低落的现象。因此，喷涂实验需要在一定的送丝速度范围内进行。

图3所示为同一层流等离子体射流条件下(气流量2.1×10^{-4}kg/s)，以不同送丝速度喷涂得到的涂层断面。

如图3a所示，在送丝速度12mm/s条件下得到的涂层组织颗粒尺寸小，粒间边缘不光滑，说明在这个较低的送丝速度时，丝材没有到达高温高速的中心区即被熔化，只有部分雾化的小颗粒得以加速并沉积于基板。在适中的送丝速度时(图3b)，可以得到粒度比较合适，粒间结合较好，大间隙较少的涂层组织。图3c所示结果表明，22mm/s的送丝速度似乎过大，会引起雾化颗粒的粗化和孔隙增大。对于本文层流等离子体大气压喷涂实验，在气流2.1×10^{-4}kg/s、电流180A、喷涂距离100mm的条件下，采取16～20mm/s的送丝速度时涂层质量最好。对于不同的实验条件，如气流、电流等参数改变，送丝速度可以随之作相应调整。只有送丝速度与射流速度和温度有良好的协调和配合时才可以得到优质的涂层。

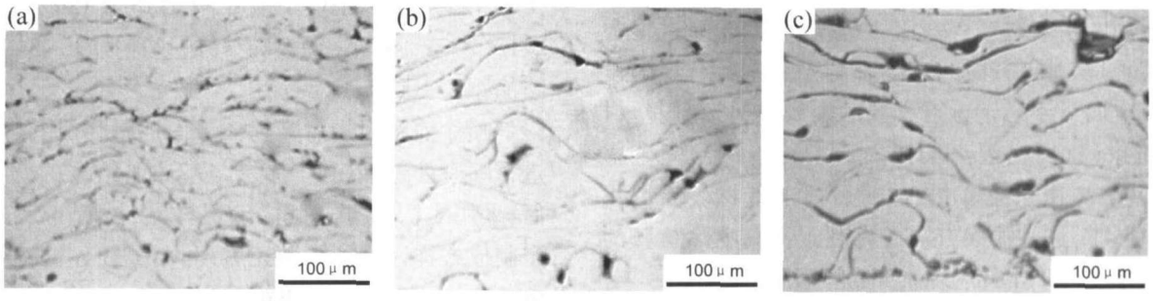

图3 不同送丝速度条件下得到的涂层断面组织

Fig. 3 Microstructures on cross-section of the coatings sprayed at different wire feeding rate

(a) 12 mm/s (b) 16 mm/s (c) 22 mm/s

2.3 发生器工作气流量对涂层结构的影响

在工作电流不变的情况下，增大发生器工作气流量，射流速度提高，丝材熔化后迅速被射流雾化，粒度均匀，而且较高的射流速度有利于颗粒加速，使得颗粒撞击基本表面时有足够的撞击力，因而可充填基体表面凹凸，达到很好的贴附与结合，又不会因颗粒的过热和强烈的撞击而飞溅。如图4a所示，在2.7×10^{-4}kg/s气流量的层流条件下喷涂的涂层断面组织，

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

与气流量稍小的 2.1×10^{-4}kg/s 层流射流喷涂涂层组织(图3)相比,涂层内的孔隙和粒间间隙明显减少。

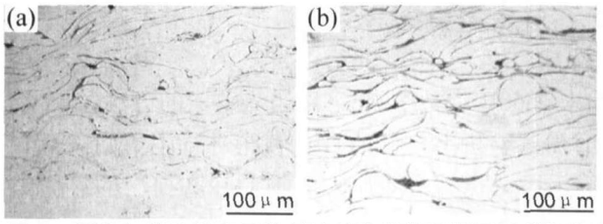

图4 层流与湍流等离子体射流喷涂的涂层断面显微组织
(a) 层流 2.7×10^{-4}kg/s (b) 湍流 4×10^{-4}kg/s
Fig. 4 Microstructure on cross section of the rate coatings rate sprayed at deferent gas flow rate
(a) laminar 2.7×10^{-4}kg/s (b) turbulent 2.7×10^{-4}kg/s

本试验采用的等离子体发生器,在工作电流不变的情况下,工作气流量超过一定值时,射流的流动状态将发生由层流向湍流的转变,射流的最大速度增高,最高温度稍有下降,射流的长度骤减到60 mm以下。湍流等离子体射流喷涂,对熔化的金属液滴的雾化作用加强,颗粒细小、飞行速度高。图4b为工作气流量 4×10^{-4}kg/s 条件下湍流射流喷涂的涂层断面组织。由于湍流射流对周围空气的强烈卷吸,射流中的空气掺混量可能远高于层流射流中的空气含量[8],金属液滴表面很容易被氧化;同时,由于射流长度短,对于100mm的喷涂距离,细小的液滴在到达基体表面前已开始冷却。涂层组织的颗粒间隙增大,孔隙量增高(如图4b所示)。

2.4 讨论

利用扫描电镜对喷涂涂层进行简单的成分分析。图4a对应的涂层的扫描电镜照片和相应部位的能谱强度面分布图如图5所示。对于图5a中"1"所示的涂层中较大的粒间间隙区域,由图5b~d可见,在这一对应区域,铁的能谱强度很低,而氧和硅的能谱强度则相对其它区域较强。由此可以推测此类间隙区域并非是喷涂过程中形成的氧化膜,而是制样或研磨过程中嵌入涂层组织大间隙中的夹杂物。能谱分析对这一区域的成分粗略测试的结果为:2.0wt% O,0.76wt% Si,余量为铁,实际喷涂过程中涂层的氧化量可能远低于这一测量值。

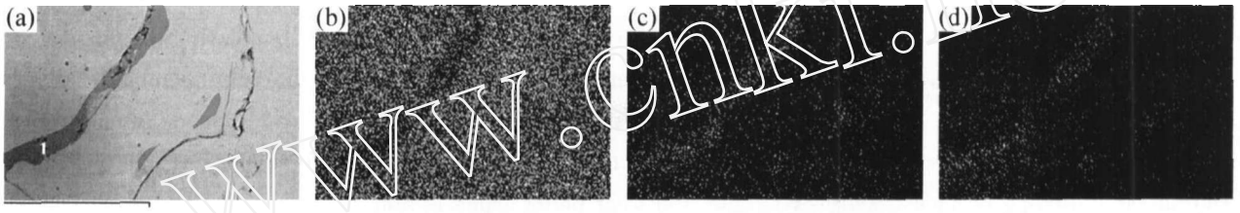

图5 涂层组织的扫描电子显微镜照片(a)与铁(b) 氧(c) 硅(d) 能谱强度面分布图
Fig. 5 Scanning electron microscope image of the coating and
(a) energy spectrum distribution of iron (b) oxygen (c) silicon element (d) respectively

3 结论

(1)用层流等离子体射流作为材料加热热源,对金属丝材进行大气压等离子体喷涂,能够获得粒间间隙小、孔隙率低的涂层;适当增大射流工作气流量,有利于喷涂材料的雾化和加速并获得致密组织的涂层。

(2)送丝速度对涂层组织影响很大。供丝速度过低,丝材没有到达高温高速的射流中心区即被熔化,只有在边缘部分被雾化的小颗粒得以加速并沉积于基板;送丝速度过大,雾化后颗粒粗大,孔隙增大。

(3)通过合理参数调节,能利用层流等离子体射流制备氧化物含量低、孔隙少、结合良好的金属涂层。

参考文献:

[1] Heimann R B, Plasma Spraying Coating Principles and Applications[C]. New York, 1996:75.

[2] 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,1999:41-47.

[3] Xian Meng, Wenxia Pan, Chengkang Wu. Flow field and heat transfer characteristics of a laminar plasma jet[C]. TAORMINA, Italy: Department of Chemistry, University of Bari, Institute for Inorganic Methodologies and Plasmas (IMIP) June 22-27, 2003:ISPC-243.

[4] Ma W, Fei Q X, Pan W X and Wu C K. Investigation of laminar plasma remelting/cladding processing[J]. Applied Surface Science, In Press. Corrected Proof, Available online 24 June, 2005.

[5] 费群星,李 罡,等,非转移弧层流等离子体射流铸铁表面熔凝强化[J],金属热处理,2004(7):60-63

[6] 周庆生,等离子体喷涂技术[M]. 江苏:江苏科学技术出版社,1982.

[7] Pan W X, et al. Generation of long, laminar plasma jet at atmospheric pressure and effect of flow turbulence[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2001, 21:23-35.

[8] 程 凯,陈 熙,等. 屏蔽气体对氩等离子体冲击射流的影响[C]. 中国工程热物理学会编,中国工程热物理学会传热与传质学学术论文集,吉林,2004:1111-1114.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net