

等离子弧焊中电弧反翘现象的数值模拟

殷凤良, 胡绳荪, 高忠林, 朱双春

(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 根据流体的质量、动量、能量守恒方程, 建立了穿孔等离子弧焊接过程中的等离子电弧三维数学模型, 用磁矢量法求解磁场问题。模型包括了一部分喷嘴和钨阴极, 小孔也被包含进模型中。利用 ANSYS 有限元分析软件求解模型, 得到等离子电弧的温度分布, 以研究等离子弧焊中电弧反翘现象。结果表明, 等离子电弧反翘随小孔尺寸的增大而减弱, 电弧尾焰随小孔尺寸的增大而增强; 而适当的增加焊接速度以使小孔轴线与电弧轴线之间形成一定的偏差是形成等离子电弧反翘现象的必要条件; 焊接电流主要是通过改变小孔尺寸而对电弧反翘产生影响。

关键词: 电弧反翘; 等离子弧焊; 小孔; 模拟

中图分类号: TG444 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)09-029-05



殷凤良

0 序 言

小孔状态的实时检测及小孔稳定性的控制一直是穿孔等离子弧焊接技术应用的瓶颈, 也是众多焊接工作者致力解决的问题。其中, 根据等离子体导电特性设计的等离子电弧反翘检测法是一种简单实用、快捷可靠的方法^[1]。等离子弧焊接过程中, 在适当的焊接工艺参数下, 等离子电弧沿焊接反方向在工件的正面会形成一个“尾巴”, 称之为电弧反翘。电弧反翘是高速的等离子体流作用在熔池表面产生反射而形成的。通过研究, 发现等离子电弧反翘的形成是需要一定条件的。由于试验研究的限制, 使其理论研究很难深入进行, 而数值模拟技术为此研究带来了光明的前景。等离子电弧及反翘的物理本质可以通过质量、动量和能量等守恒方程来描述, 并已有许多学者建立了等离子电弧的数值模拟模型, 但以往的模型大都是二维模型。等离子弧反翘的存在使得电弧是非轴对称的, 这就需要三维模型来实现数值模拟研究。

1 等离子电弧模型的建立

1.1 控制方程

在等离子弧数值模拟研究时, 首先要进行以下

假设。

- (1) 电弧处于局部热力学平衡(LTE)状态。
- (2) 电弧区为纯氩气体。
- (3) 电弧是光学薄的, 即辐射的重新吸收和总的辐射损失相比可以忽略不计。
- (4) 电弧是处于层流不可压缩状态的。

在满足上述假设条件下, 等离子电弧的质量、动量和能量守恒方程可以表示为如下形式。

质量连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0,$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; \mathbf{v} 为速度矢量; ∇ 为哈密顿算子。

动量守恒方程(N-S 方程)为

$$\frac{\partial (\rho v_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_x \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla v_x) + J_y B_z - J_z B_y,$$

$$\frac{\partial (\rho v_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_y \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v_y) + J_z B_x - J_x B_z,$$

$$\frac{\partial (\rho v_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_z \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla v_z) + J_x B_y - J_y B_x,$$

式中: x, y, z 分别为坐标轴的三个坐标分量; v_x, v_y, v_z 分别为 x, y, z 方向的速度分量; μ 为粘性系数; J_x, J_y, J_z 分别为 x, y, z 方向的电流密度分量; B_x, B_y, B_z 分别为 x, y, z 方向的磁感应强度分量; p 为压强。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[\frac{K}{c_p} \nabla h \right] - S_r + \frac{J^2}{\sigma},$$

式中: h 为焓; c_p 为定压比热容; k 为导热系数; S_r 为辐射流密度; J 为电流密度; σ 为电导率。

动量守恒方程中有洛伦兹力项, 能量守恒方程中有焦耳热项, 需要求解磁感应强度 B 和电流密度 J 的分布。引入磁矢量 A 以方便磁感应强度 B 的求解^[2], 磁矢量 A 与磁感应强度 B 的关系为

$$\nabla \times B = A.$$

则求解以下方程可得磁感应强度 B 与电流密度 J 的分布, 即

$$\begin{cases} \nabla \cdot J = 0 \\ J = -\sigma \nabla \phi \\ -\nabla^2 \cdot A_x = \mu_0 J_x, \\ -\nabla^2 \cdot A_y = \mu_0 J_y, \\ -\nabla^2 \cdot A_z = \mu_0 J_z \end{cases}$$

式中: ϕ 为电势; μ_0 为真空磁导率; A_x, A_y, A_z 分别为 x, y, z 方向的磁矢量。

1.2 小孔描述

熔化的液态金属在等离子束流强有力的冲击作用下产生下凹, 当等离子电弧作用力足够大时将会产生小孔。熔化金属的温度非常高, 很难用试验手段实时准确测定小孔的形状。通过拍摄焊接过程中等离子电弧照片和焊后凝固小孔形貌来粗略估计形成电弧反翘时的小孔形状。图 1 是形成电弧反翘时整个等离子电弧轮廓。

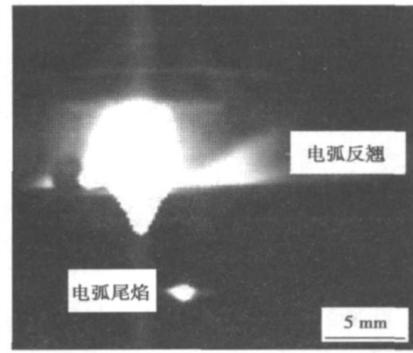


图 1 含有反翘和尾焰的等离子电弧
Fig 1 Plasma arc including a reflection and efflux

假设小孔最底部处为一圆面, 定义其直径为小孔尺寸, 其轴线为小孔轴线, 而把钨电极的轴线作为等离子电弧轴线, 尽管小孔与电弧并不是轴对称的, 这样做的目的是为了更方便给出特征参数。从图 1 中的电弧尾焰与电弧轴线的相对位置可以看出, 形成电弧反翘时小孔轴线与电弧轴线存在一定的偏差。焊接结束时, 金属熔池在等离子气和保护气的冷却作用下能迅速凝固, 在一定程度上保持了小孔形貌。图 2a 是凝固小孔的剖视图, 小孔壁面由顶部平滑的过渡到底部。通过以上两点大致判断形成电弧反翘时小孔的形貌, 所确定的小孔尺寸如图 2b 所示, 在小孔顶部, 电弧轴线所在的纵截面将小孔分为一个半圆和一个半椭圆两部分, 小孔轴线与电弧轴线不重合, 两轴线之间的距离为 D_a , 小孔壁面从顶部平滑的过渡到底部。圆的半径取 3 mm, 这是根据文献[5]所模拟得到的电弧压力半径确定的。而椭圆的长半径是这样确定的: 半圆与半椭圆在小孔横截面上的端点到小孔轴线的距离相等。模拟结果表明电弧反翘对小孔的形状不是很敏感, 所以进行这样大致的估计也是可以的。图 2b 中两个重要的特征尺寸分别是电弧轴线与底部小孔轴线间的距离 D_a 和小孔尺寸 D_k 。

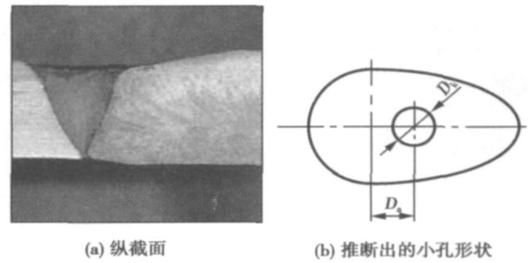


图 2 形成反翘时的小孔
Fig. 2 Keyhole when arc reflection is produced

1.3 计算区域

选取的计算区域如图 3 所示。虽然电弧不再是轴对称的, 但仍存在一纵切面将电弧分为相等的两部分, 因此可以选取一半电弧进行计算, 以减少计算量。电场计算区域包括 1, 2, 3 部分, 包含阴极区域 3 可以避免在阴极端部处电流密度边界条件的假设。与电场相比, 磁场计算区域增加了 5, 6 部分, 目的是方便边界条件的确定。流场计算区域为 1, 2, 4

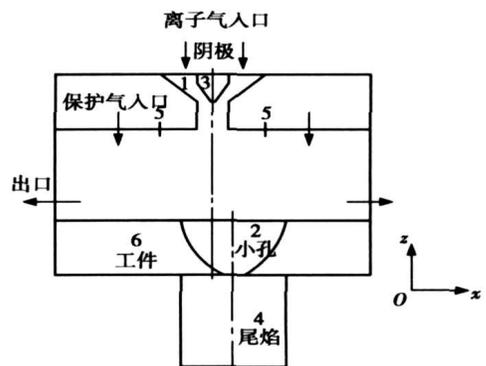


图 3 计算区域
Fig 3 Calculating domain

部分。

1.4 边界条件

1.4.1 电磁场边界

阳极表面的电势 ϕ 定义为零,其它面的电势 ϕ 沿壁面法线方向的导数为零,即 $\partial\phi/\partial n=0$,其中, n 为单位法线向量。在钨电极截面处电流密度为

$$J_z = \frac{I}{\pi R_1^2}, \quad J_x = J_y = 0,$$

式中: I 为焊接电流; R_1 为钨极半径。

磁场计算区域的外圆弧面处距离电弧中心较远,电流密度很小,磁感应强度也应很小,因此可以定义此处的磁矢量各分量为零。磁感应强度垂直于对称面,所以在对称面上需要定义磁矢量垂直分量 A_y 为零。在模型的上下两个端面上,定义磁矢量面内分量 A_x 和 A_z 为零,表示磁感应强度平行于端面。

1.4.2 流场边界

等离子体气体出口处定义相对压强 p 为零,包括部分 2 的外圆弧面、尾焰部分 4 的圆弧面和底面处。在喷嘴壁面、电极壁面及阳极表面和熔池表面上的各速度分量均为零。等离子气入口处,垂直方向速度分量按下式计算,即

$$v_z = 2 \frac{Q}{\pi \rho} \frac{\left[R_2^2 - r^2 + (R_2^2 - R_1^2) \frac{\ln(r/R_2)}{\ln(R_2/R_1)} \right]}{\left[R_2^2 - R_1^2 + \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln(R_2/R_1)} \right]},$$

式中: Q 为等离子气流量, r 为径向距离; R_2 为喷嘴内半径,其余方向速度分量为零。

保护气入口处,速度各分量沿法线方向的梯度为零。在对称面上,垂直方向速度分量为零,其余速度分量沿法线方向的梯度为零。

液体金属存在的温度区间一般在 1 500 ~ 3 000 K 之间,这个温度变化区间相对于等离子体电弧的几万度高温来说是较小的,这里取阳极工件表面和阴极电极壁面的温度为 2 000 K;对称面绝热边界条件;其它面的温度为 1 000 K。

2 模型求解

采用映射方法划分网格,由于靠近电极的地方存在较大温度变化,为得到较为精确的数值解,该区采用较大的网格密度。

整个求解过程是这样的:首先在电场环境中假设一个初始温度分布,计算电流密度的分布;将电流密度的计算结果代入磁场,计算电磁力和焦耳热的分布;最后把电磁力和焦耳热的计算结果作为体积力和体积生热代入流场中,耦合计算速度和温度分

布;再将流场中计算出的温度分布代入电场计算电流密度分布。如此反复,直至收敛^[3]。模型的求解计算有两种方法,一种是自己编写程序代码求解方程组,另一种是用商用软件求解。由于模型是三维的,计算量相当大,且计算过程非常复杂,编写代码有一定的难度,这里采用 ANSYS 商用有限元软件进行求解计算。

氩气的电导率、热导率、粘度、热辐射流密度随温度变化的关系见文献[4]。

设置一个较小的压力和动量松弛因子,以及设置一个压力和温度的不合理最大值都有助于得到收敛解。

3 结果与讨论

用温度场来表征等离子体电弧,一般光学仪器和肉眼观察到的电弧发亮区域是温度在 1 0000 K 以上的区域,而 7 000 K 是等离子体导电率迅速增大的临界温度。这里给出 7 000 K 以上的等离子体温度云图分布。

等离子电弧反翘受到焊接电流和焊接速度等焊接参数的影响,焊接电流和焊接速度等是通过影响小孔状态进而影响到电弧反翘的。焊接电流和焊接速度是影响电弧反翘根本原因,而小孔的状态是直接体现。这里研究小孔状态对电弧反翘的影响,其意义在于探索发现电弧反翘与小孔状态的关系。计算过程中用到的参数为:焊接电流 120 A;离子气流量为 4 L/min。

3.1 小孔尺寸对电弧反翘的影响

图 4a ~ 图 4d 分别是小孔轴线与电弧轴线偏差为 2 mm 情况下,模拟得到的小孔直径从 0 ~ 4 mm 逐渐增大时等离子电弧反翘的变化情况。在小孔刚要形成时,电弧反翘最强,这时还没有电弧尾焰现象;小孔直径为 1 mm 时,工件背面出现电弧尾,但由于小孔直径较小,从工件背面流出的等离子流较少,所以这时电弧反翘还较强,比刚要形成小孔时稍有减弱;随着小孔直径尺寸进一步增加到 3 mm 时,电弧反翘明显变弱,电弧尾焰显著增强;当小孔尺寸为 4 mm 时,大部分等离子体从工件背面流走,电弧反翘基本消失了。

可见,小孔尺寸与电弧反翘之间存在一定的关系,通过电弧反翘可以反应出小孔的状态。这个结论对等离子弧焊接过程的控制是非常有意义的,例如,“一脉一孔”等离子弧焊中小孔状态的检测是保证焊接质量的关键所在,而电弧反翘在工件的正面,更利于作为控制信号。

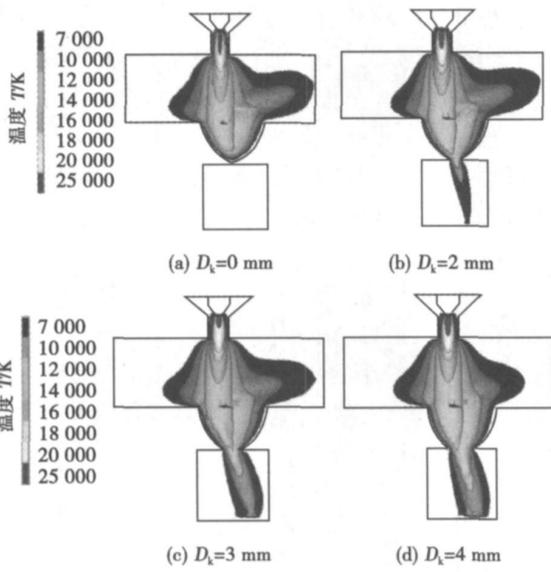


图 4 电弧反翘与小孔尺寸的关系

Fig. 4 Simulated plasma reflections with different keyhole dimension

3.2 D_a 对反翘的影响

要想利用等离子电弧反翘信号实现等离子弧焊接过程控制, 首先应当弄清等离子电弧反翘产生的条件。模拟结果表明, 等离子电弧中心与小孔中心的距离 D_a 对等离子体反翘的产生有重要影响。造成等离子电弧轴线与小孔轴线之间偏差的原因是由于金属的熔化需要一定的时间, 相对于电弧移动来说有一定的滞后性, 造成电弧轴线后面的液体金属多于轴线前面的液体金属, 因此从电弧中心轴来看, 熔池是非对称的。正是由于熔池的非对称性使得等离子体流大部作用在熔池前半部分, 又沿熔池后半部分流出, 形成等离子体反翘。

图 5 与图 4b 分别是小孔尺寸为 1 mm 时不同 D_a 下的电弧形态。当两个中心轴重合时, 没有等离子电弧反翘现象发生; D_a 为 1mm 时电弧反翘也不

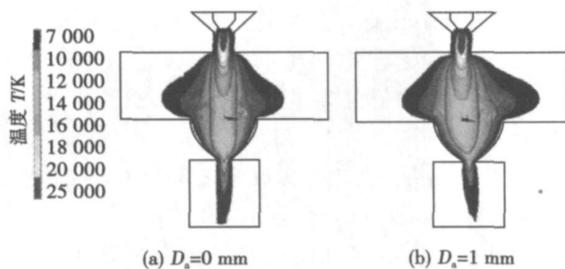


图 5 不同 D_a 下的电弧反翘

Fig 5 Arc reflections with different D_a

太明显; 当 D_a 增大到 2 mm 时, 电弧反翘变得非常强。如前所述, 两个中心轴之间的距离是由于等离子电弧相对于工件的移动造成的, 等离子体电弧移动速度越大, 则 D_a 越大。由此可见, 相当的电弧移动速度是产生等离子电弧反翘现象的必要条件。

3.3 焊接电流对反翘的影响

焊接电流对电弧反翘的影响体现在两个方面: 一方面, 焊接电流会影响小孔尺寸, 进而影响到电弧反翘; 另一方面, 电流的改变将会影响等离子电弧的温度分布和电弧力等, 从而将影响到电弧反翘的强弱。利用电弧反翘作为焊接过程控制信号时, 希望焊接电流的第二个影响因素越小越好, 这是因为通过改变焊接电流来改变小孔状态时, 电弧反翘更能反映小孔信息。

图 6 是焊接电流为 150 A、小孔尺寸为 1 mm、电弧与小孔轴线之间距离 D_a 为 2 mm 时的电弧反翘, 与图 4b 相比, 两种电流下的电弧反翘形貌相差不大, 这说明在一定范围内焊接电流的变化从改变等离子电弧本身形态方面来说对电弧反翘的影响不大。

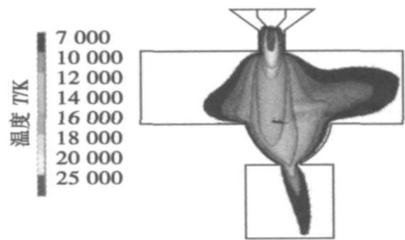


图 6 焊接电流 150 A 时的电弧反翘

Fig. 6 Arc reflections with a current of 150 A

4 结 论

(1) 在小孔存在的条件下, 建立了三维非轴对称等离子电弧模型, 用等离子电弧温度场可以表征电弧反翘现象。

(2) 电弧反翘可以反映出小孔的尺寸, 随小孔尺寸的增大电弧反翘变弱。

(3) 电弧轴线与小孔轴线之间存在一定的偏差是形成电弧反翘的必要条件。调节焊接速度, 以控制电弧轴线与小孔轴线之间的距离达到控制电弧反翘的现象。

(4) 焊接电流可以改变等离子电弧形态而对电弧反翘造成的影响不大。

参考文献:

- [1] 梁淑华, 范志康, 时惠英, 等. 超细 Al_2O_3 颗粒增强铜基复合材料的研究[J]. 复合材料学报, 1998, 15(3): 44-48.
- [2] 申玉田, 崔春翔, 孟凡斌, 等. 高强度高电导率 $Cu-Al_2O_3$ 复合材料的制备[J]. 金属学报, 1999, 35(8): 888-892.
- [3] 张 洁, 许晓静, 陈康敏, 等. SiC_p 尺寸对 SiC_p/Cu 基复合材料耐磨行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(4): 301-305.
- [4] 尹延国, 刘君武, 郑治祥, 等. 石墨对铜基自润滑材料高温摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(3): 216-220.
- [5] 王浪云, 涂江平, 杨友志, 等. 多壁纳米碳管/ Cu 基复合材料的摩擦磨损特性[J]. 中国有色金属学报, 2004, 11(3): 367-371.
- [6] 湛永钟, 张国定, 曾建民, 等. 石墨混杂增强铜基复合材料的高

温摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(3): 223-227.

- [7] 许晓静, 刘桂玲, 王宏宇, 等. 微米 Wp/Cu 基复合材料耐磨行为[J]. 中国机械工程, 2005, 16(19): 1783-1784.
- [8] 徐 磊, 梁淑华, 范志康, 等. 高强度高电导率 $Cu-Al_2O_3$ 复合材料的制备[J]. 热加工工艺, 2002, (1): 39-43.
- [9] 卢德宏, 顾明元, 施忠良, 等. SiC 和 Gr 颗粒混杂增强 Al 基复合材料的摩擦磨损特性的研究[J]. 复合材料报, 2000, 17(1): 60-64.
- [10] Zhan Y Z, Zhang G D. The dry sliding wear behavior of SiC_p/Cu composites[J]. Key Engineering Materials, 2003, 249(5): 227-232.

作者简介: 张 洁 男, 1964 年出生, 副教授, 博士。主要从事金属材料成形及表面工程的研究。发表论文 30 余篇。

Email: zhangjie_ujs@163.com

[上接第 32 页]

参考文献:

- [1] Zhang Y M, Zhang S B, Liu Y C. A plasma cloud charge sensor for pulse keyhole process control[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(8): 1365-1370.
- [2] Blais A, Prouk P, Boulos M I. Three-dimensional numerical modeling of a magnetically deflected dc transferred arc in argon[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(5): 488-496.
- [3] 芦凤桂, 姚 舜, 楼松年, 等. 焊接熔池表面变形对电弧行为特征的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(2): 57-60.

- [4] Choo T C, Szekely J, Westhoff R C. On the calculation of the free surface temperature of gas-tungsten-arc weld pools from first principles; Part I. modeling the welding arc[J]. Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, 1992, 23B(6): 357-369.

- [5] 殷凤良, 胡绳荪, 郑振太, 等. 等离子弧焊电弧的数值模拟[J]. 焊接学报, 2006, 27(8): 51-54.

作者简介: 殷凤良, 男, 1980 年出生, 博士研究生。研究方向为焊接过程控制及数值模拟技术。发表论文 10 余篇。

Email: yfl_dl@163.com

transformation method, and a full kinematics model was established. And then a seam tracking controller based on fuzzy-gaussian neural network (FGNN) was described by applying a Gaussian function as an activation function, taking lateral slider position and heading angle of the robot as input signals and the adjusted angle for welding torch as output, a specialized learning architecture was used so that membership function could be tuned in real time by applying the backpropagation algorithm of FGNN controller. The experiment results show that the proposed controller has excellent tracing accuracy (within ± 0.5 mm), and can satisfy the requirement of practical welding project.

Key words: kinematics model; welding mobile robot; seam tracking; fuzzy neural network

Friction stir spot welding process and mechanical properties of LY12 aluminum alloy LIU Kewen^{1,2}, XING Li¹, KE Liming¹ (1. Schools of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong university, Nanchang 330063 China; 2. Jiangling Motor Company, Nanchang 330001, China). p21–24

Abstract: Friction stir spot welding (FSSW) is a relatively new solid state joining method, which is a variant of friction stir welding. The effect of the welding parameters on the shaping and mechanical properties of friction stir spot welded joint of 2 mm LY12 Al alloy was investigated. The results show that when the welding time is fixed, welding spot appearance is better with the increasing of the tool rotation speed, and it becomes worse with the decrease of the tool rotation speed and the welding time. The tensile shear strength of the spot increases firstly, and then reduces with the increasing of tool rotation speed. When the tool rotation speed is 950 r/min and welding time is 12 s, the maximum strength is up to 9.33 kN/spot. The microhardness show that the distribution of microhardness is high-low-sight higher-low-high along the centre of the keyhole, and the minimum value is in the heat affected zone, and the microhardness of plasticity zone was slightly lower than that of base metal.

Key words: Al alloy; friction stir spot welding; appearance of welding spot; mechanical properties

Microstructure and wear-resistance property of NiCrWRe alloy sprayed coating ZHANG Zhenyu^{1,2}, WANG Zhiping², LIANG Bunv¹ (1. Mechanical Engineering Department, Lanzhou Polytechnic College, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of New Nonferrous Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p25–28

Abstract: The NiCrWRe sprayed coating was prepared on the surface of 45 carbon steel by using flame spraying. The sprayed coating was characterized by abrasive wear resistance test, and compared with the NiCrW alloy coating. Scanning electron microscope, energy dispersion spectroscopy and X-ray diffraction were employed to analyze the morphologies of the coatings, as well as their phase structures. The bonding strength of coating/substrate interface was

tested by means of tensile strength. The results showed that the coating is firmly adhered to substrate, and contains the hard phase with higher proportion. Adding rare earth element can obviously increase the wear resistance of the coatings. In the given conditions, the wear resistance of NiCrWRe coating is much higher than that of NiCrW alloy coating.

Key words: rare earth; spray-fused coating; abrasive wear; wear resistance property

Numerical simulation of arc reflection in plasma arc welding processing YIN Fengliang, HU Shengsun, GAO Zhonglin, ZHU Shuangchun (College of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p29–32, 90

Abstract: A three-dimensional mathematical arc model in keyhole PAW (plasma arc welding) process was established based on the mass, momentum and energy conservation equations. Magnetic-vector method was employed to solve the magnetic problem. A part of nozzle and tungsten electrode, as well as keyhole, were included into the model. The model was solved with ANSYS software. The simulated temperature was taken to indicate the arc reflection occurring in PAW processing. The plasma arc can be divided into main body, arc reflection and arc wake flame, which can be obtained from the simulated result. The effects of the keyhole dimension and offset between the arc axis and keyhole axis on the arc reflection were studied. The simulated results show that the arc reflection gets weaker and arc wake flame gets stronger with the increase of keyhole dimension, and a higher welding velocity to induce the offset between the arc axis and keyhole axis is necessary to the appearance of arc reflection, and the effects of welding current on the arc reflection are extended mainly through changing the keyhole dimension.

Key words: arc reflection; plasma arc welding; keyhole; simulation

Nd:YAG laser welding of rapid-solidified heat-resistant aluminum alloy AA8009 DING Ronghui, LI Wenxian, WANG Richu, YU Kun (College of Materials Science and Technology, Center South University, Changsha 410083, China). p33–38

Abstract: Welding of rapid-solidified heat-resistant aluminum alloy AA8009 is very important to its application. Different welding parameter were used in the Nd:YAG laser butt welding of 1 mm thick AA8009 plate. The results show that, with the welding speed increase, and the total energy input decreases, and the cooling rate within the weld increases, and the weld microstructure are improved and changed from equilibrium state to non-equilibrium state microstructure. When the energy input is 8.15 J/mm, the tensile strength reaches 379.9 MPa, that the weld coefficient reached to 95% and the fracture happens at the boundary fusion zone.

Key words: rapid-solidified; heat-resistant aluminum alloy AA8009; Nd:YAG laser welding

Effects of single and composite component oxides activating flux-