

文章编号:1002-025X(2006)04-0018-04

氮氩气体保护的TIG焊接电弧等离子体流场的数值分析

李彩辉, 雷玉成, 郁雯霞, 程晓农

(江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 以直流TIG焊接电弧为对象, 依据磁流体动力学理论构建电弧的数学模型, 运用ANSYS有限元分析软件对二维稳态下轴对称的、氮氩混合气体保护的TIG焊接电弧进行了数值分析, 得到了 $\varphi(\text{N}_2)50\%+\text{Ar}$ 混合气体保护下焊接电弧的温度场、速度场的形态分布特征。分析表明, 氮氩电弧的最高温度出现在近阳极区域, 电流密度、等离子体速度和电弧压力的最大值均出现在近阴极区。同时分析了不同电流、弧长对阳极表面电流密度的分布的影响, 随着电流的增大, 阳极表面电流密度增大, 而随着弧长的增大, 电流密度减小。

关键词: TIG焊接电弧; 氮氩混合气体保护; 磁流体动力学; ANSYS

中图分类号: TG403; TG444.77

文献标识码: A

焊接电弧是一个高速运动的磁流体热源。焊接电弧的热能特性和力学特性直接影响着熔池和母材表面的热流分布、熔池的热传递和熔池内液态金属的流动, 从而影响焊缝成形和焊接质量。由于电弧等离子体极端的温度条件, 电弧参数的试验测定极其困难, 而数值分析则可在一定的数学模型下提供完整的流场、热场及热物理参数信息。由于氩气保护的TIG焊接电弧具有稳定的电弧长度和较高的焊接质量, 因此对焊接电弧的数值模拟研究一直集中在氩气保护的TIG电弧上^[1,2], 而对其他气体保护的电弧的数值模拟研究还很少报道。

氮氩混合气体保护的TIG焊接电弧, 是一种有发展潜力和应用前景的电弧热源。试验研究表明^[3], 当氮气在混合气体中的比例达到50%时, 电弧的特性即表现为氮弧的特性, 因此, 选取 $\varphi(\text{N}_2)50\%+\text{Ar}$ 作为保护气体研究TIG焊接电弧的能量分布状态, 突出氮气在混合气体中的作用, 以期得到更加高热高能电弧。

1 电弧的数学模型及边界条件

1.1 基本假设

在计算中对焊接电弧的一些假定条件为:

- (1) 假定电弧是处于局部热动态平衡 (LTE) 的, 即电子和重粒子的温度基本相等。
- (2) 电弧是稳定的、连续的、对称的。
- (3) 电弧是光学薄的, 流动处于层流状态。
- (4) 由于粘性效应导致的热损失忽略不计。
- (5) 氮氩气体混合均匀。

电弧的数值计算用模型如图1所示。

1.2 控制方程

焊接电弧是一种带电的流体, 因此, 用磁流体动力学的理论来分析和研究。在轴对称的情况下, 电弧数学模型的方

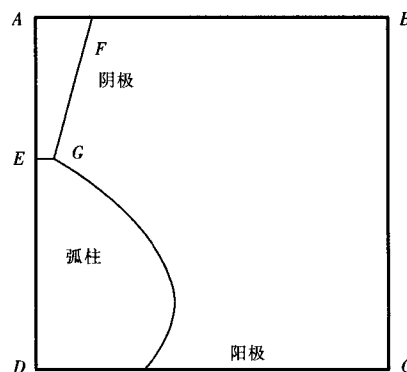


图1 电弧数值计算模型

程组如下所示:

(1) 磁流体动力学方程

质量连续方程:

$$\frac{1}{x} \frac{\partial(x\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

动量守恒方程的轴向表达式:

$$\rho v \frac{\partial u}{\partial x} + \rho u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial F}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right] + \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left[x \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left[x \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right] + j_x B_\theta + \rho g, \quad (2)$$

径向表达式:

$$\rho v \frac{\partial v}{\partial x} + \rho u \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial F}{\partial x} + \mu \left(2 \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left[x \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] - 2 \frac{v}{x^2} \right) - j_z B_\theta, \quad (3)$$

能量守恒方程:

$$\rho C_p \left[v \frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left[x k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{5k_b}{2e} \left[j_x \frac{\partial T}{\partial x} + j_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{j_x^2 + j_z^2}{\sigma} - S, \quad (4)$$

其中: u, v 分别是等离子体的轴向和径向速度; ρ 为气体密度; μ 为粘度; F 为气体压力; B_θ 为磁感应强度; j_x, j_z 分别为径向和轴向的电流密度; T 为温度; S 为单位面积辐射能; C_p 为

收稿日期: 2005-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50475126)

等容热容； e 为电子电量； k 为热导率； k_B 为波尔兹曼常数。

(2) 麦克斯韦方程

电流连续方程：

$$\frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left[\sigma x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right] = 0, \quad (5)$$

欧姆定律：

$$j_x = -\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad j_z = -\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (6)$$

安培环流定律：

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{x} \int_0^x x j_z dx, \quad (7)$$

其中： Φ 为电势； σ 为电导率； $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ，为真空磁导率。

1.3 边界条件

焊接电弧模拟区的边界条件见表1，由于在温度小于5 000 K时气体的电导率非常小，因此在第1次计算电场时为了保证气体处于导电状态，弧柱区的温度赋初始值为10 000 K，阳极表面温度为6 000 K。在整个电弧区域中温度的大小范围很大，气体在不同温度下的各种物理参数高度非线性，各种数据的选取见文献[4]~[6]。

表1 焊接电弧边界条件

边界	$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	T/K	Φ/V
AE	0	0	—	—
ED	$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$	0	$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0$
DC	0	0	6 000	常数
BC	$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial v}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0$
BF	$u_{\text{焰}}$	0	1 000	$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0$
AF	—	—	—	$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = j_{\text{焰}}$
FG	0	0	3 000	—
EG	0	0	3 000	—

1.4 网格划分与数值计算

采用ANSYS有限元分析软件对电弧模型进行分析，考虑到阴极尖端的几何形状计算精度以及ANSYS对流体运算的特殊要求，计算区域的网格划分一律采用变步长的映射网格，如图2所示。分析中所采用的钨极直径均为3.2 mm，阴极尖端锥角为30°。

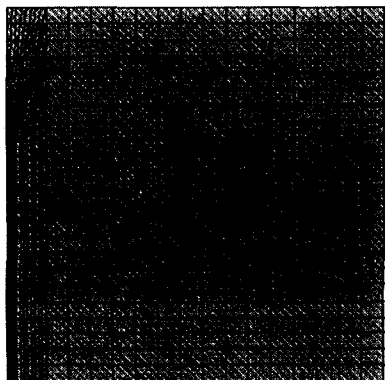


图2 电弧模型计算网格

采用ANSYS有限元分析软件对焊接电弧模型进行了数值分析。ANSYS软件具有热、电、磁和流场的耦合功能，可以便利地模拟焊接电弧。在计算电弧模型时把整个计算过程分为3个模块：电场模块、电磁场模块及流场模块。通过电场的计算可以得到电流密度的分布及电势分布。在电磁场模块的计算中，把电场计算得到的弧柱区电流密度分布作为载荷调到电磁场的模型中，第1次计算时的温度场与电场相同。通过电磁场的计算可以得到弧柱区内电磁力的分布。在流场模块的计算中，把焦耳热以及电磁力作为载荷调到流场的模型中，此时温度场的边界条件以及速度场的边界条件如表1所示。通过流场的计算就能得到阳极表面电弧压力的分布以及电弧温度场的分布。结束第1次运算之后，把电场中的温度场删除，调入流场中计算得到的温度场数据按照上述步骤进行第2次运算。不断迭代，直到前后2次计算的结果在设定的误差范围之内，计算结束。

2 计算结果与讨论

2.1 电弧温度场的分布

温度是弧柱等离子体最重要的状态参数。弧长为10 mm，焊接电流为200 A，保护气体流量为10 L/min时的电弧温度场如图3所示。由于氮气的解离吸热使得电弧收缩，电弧最高温度出现在靠近阳极的区域，而不是一般焊接电弧^[7]的近阴极区，这与试验情况^[8]相吻合。氮氩电弧的这一特点对增加阳极热输入非常有利。这种情况的出现可能是因为氮气在电弧中的解离吸热使得电弧收缩，而使电场强度、能束密度及焓值增加所致。

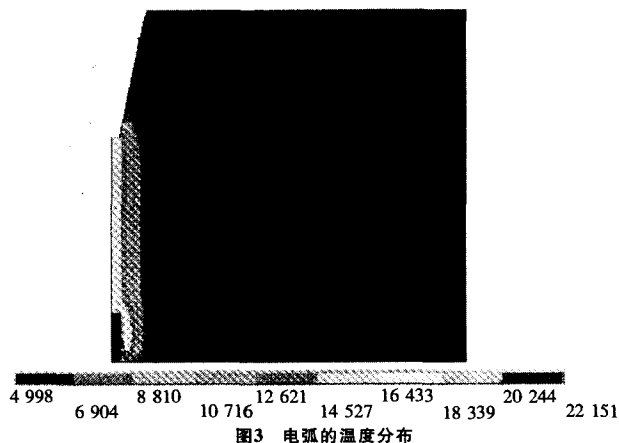


图3 电弧的温度分布

2.2 电弧电流密度的分布

图4为电弧电流密度的分布，由图可见，焊接电流从阳极表面通过电弧空间经阴极斑点区流入阴极顶端，在阴极斑点处电流密度最大，随着距阴极距离的增大，电流密度逐渐减小，在阳极表面电流密度最小。在电弧的同一截面上，随着径向距离的增大，电流密度减小。

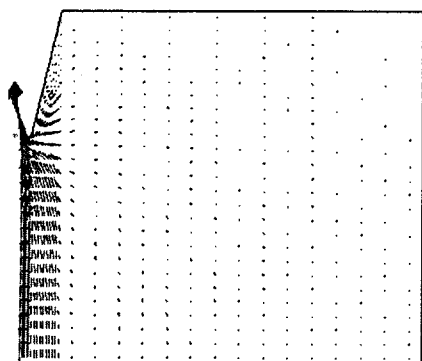


图4 电弧电流密度分布

2.3 电弧等离子体速度场的分布

电弧等离子体速度场分布情况如图5所示。由图5可见，等离子体在电磁力作用下沿轴向由阴极向阳极高速流动形成高速等离子流。当等离子体到达阳极时，由于受到阳极表面的阻碍，从而产生对阳极表面的冲击力也就是电弧压力。氮氩保护的TIG焊接电弧弧柱中心等离子体速度上限可以达到接近声速的数量级，当距阴极距离增加时，等离子体速度减小。

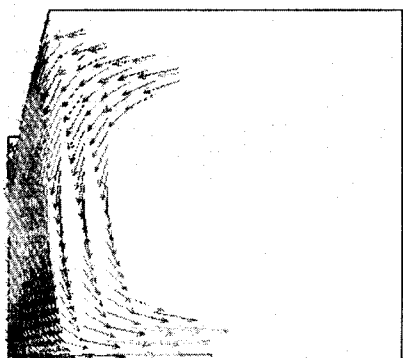


图5 电弧等离子体速度场分布

2.4 电弧电磁力的分布

图6为等离子体电磁力的分布情况。

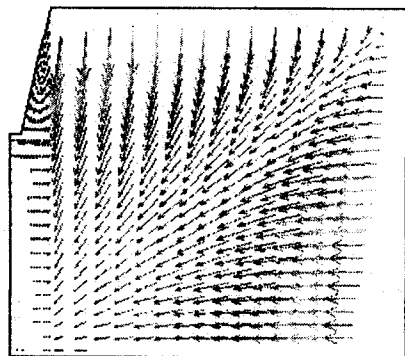


图6 等离子体电磁力的分布

在对称轴附近，由于磁感应强度接近于零，电磁力较小；靠近阳极的电弧边缘区域由于电流密度较小，其电磁力也较小；而在阴极附近，由于阴极尖端的电流密度非常大，电磁力也最大。电磁力的方向是向下向内的，由于电磁力在电弧各处分布是不均匀的，靠近钨棒处的压力大，靠近阳极处的

压力小，具有一定的压力梯度，形成向下向内的推力，驱动等离子体气流沿着对称轴自上而下向阳极流动。

2.5 不同焊接电流和弧长对阳极电流密度的影响

由焊接电弧区的电流密度分布的模拟图（图4）可见，阳极电流密度要远远小于阴极的电流密度。因为阳极表面的电流密度分布直接影响着焊缝的温度进而影响焊缝的成形，所以阳极表面的电流密度值在焊接过程的控制中一直都是非常重要的参数。弧长5.5 mm，保护气体流量为10 L/min，焊接电流不同（ $I=135\text{ A}$ ， $I=110\text{ A}$ ）时，阳极表面电流密度值的比较曲线如图7所示（横坐标表示阳极表面）。从图中可以看到，当电流为135 A时，阳极表面的电流密度最大值可以达到11 A/mm²，随着电流的增大，阳极表面电流密度值是增大的，而随着距弧柱中心距离的增大，电流密度均减小。每条曲线都有电流密度的突降区，这是由于气体的电导率与温度密切相关，在7 000 K以下，气体的电导率很小，电流密度会在这个温度范围内发生突变，这就导致了图中曲线的突降情况。

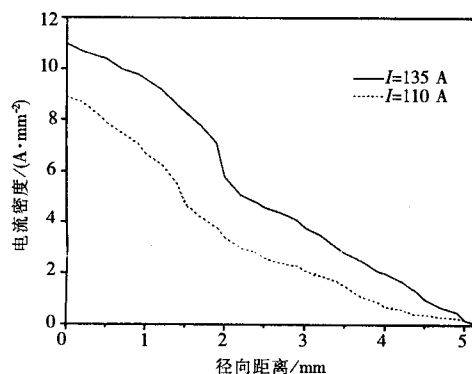


图7 焊接电流对阳极电流密度的影响

图8为焊接电流相同（110 A），保护气体流量为10 L/min的情况下，改变弧长（ $L=5.5\text{ mm}$ ， $L=7\text{ mm}$ ）所得到的阳极电流的分布曲线（图中的横坐标表示阳极表面）。从图中可以看出，在弧柱的中心区域，随着弧长的增加，电流密度值是减小的，减小的趋势非常明显；而当距弧柱中心距离稍远时，二者的电流密度值相差不大。同样的原因，曲线也有突降区。

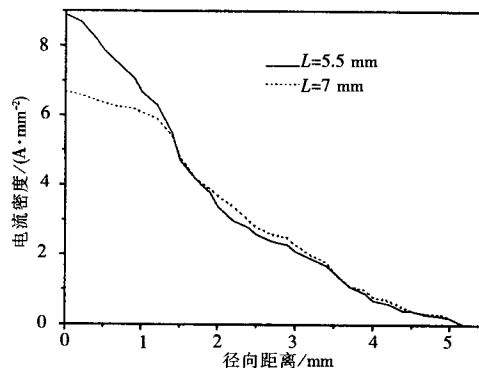


图8 弧长对阳极电流密度的影响

3 结论

(1) 以氮氩保护TIG焊接电弧为对象，依据磁流体动力学

文章编号:1002-025X(2006)04-0021-02

1420 铝锂合金激光焊接接头拉伸性能分析

庄 蕾¹, 罗 宇¹, 王亚军², 陈 俐²

(1.大连交通大学, 辽宁 大连 116028; 2.北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要: 针对2.5 mm厚1420铝锂合金板材, 研究了修饰焊和焊后热处理对激光焊接接头拉伸性能的影响, 并且分析了轧制方向对接头拉伸性能的作用。试验结果表明: 修饰焊对接头拉伸性能影响不大, 但可明显改善焊缝成形, 减少焊缝缺陷; 热处理工艺对接头的拉伸性能影响最大, 能显著提高接头的抗拉强度; 轧制方向对接头的拉伸性能没有影响。

关键词: 铝锂合金; 激光焊接; 修饰焊; 热处理; 轧制方向

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** B

铝锂合金与传统的等强度铝合金相比, 具有低密度、高弹性模量、高比刚度、高比强度等特点, 因此在国内外航空、航天以及武器装备等军工行业及民用领域中显示出了广阔的应用前景, 并在某些型号产品中得到了大量的应用。

据美国州立宾州大学应用研究实验室的初步研究, 在利用熔焊方法制造航空结构中, 激光焊是焊接铝锂合金的一种可行的方法。

由于1420铝锂合金激光焊表面成形不理想, 并且焊后接头易软化, 国内外学者一直致力于铝锂合金激光焊焊缝成形质量和性能提高的研究工作。本文针对1420铝锂合金激光焊接头进行了修饰焊和热处理这2种工艺方法对接头拉伸性能影响的研究, 并分析母材的轧制方向对拉伸性能的影响, 以期在实际生产提供必要的工艺与性能数据参考。

收稿日期: 2005-09-26; 修回日期: 2006-06-14

原理构建了电弧模型, 利用ANSYS有限元分析软件对焊接电弧进行了模拟计算。

(2) 通过耦合计算焊接电弧的热场、电磁场和流场, 得到了氮氩电弧的温度、电流密度、等离子体速度和电弧压力的分布情况。

(3) 氮氩电弧的最高温度出现在近阳极区域, 电流密度、等离子体速度和电弧压力的最大值均出现在近阴极区。

(4) 分析了不同的电流和弧长对阳极电流密度分布的影响。

参考文献:

- [1] Duchaine R, Kapadia P, Dowden J, et al. A mathematical model of the arc in electric arc welding including shielding gas flow and cathode spot location[J]. J Phys D: Appl Phys, 1995, 28: 1 840-1 850.
- [2] 樊 丁, 陈剑虹. TIG电弧传热传质过程的数值分析[J]. 机械工程学报, 1998, 34(2): 39-44.

1 试验设备及方法

试验所用材料为东北大学研制的1420铝锂合金, 具体成分见表1。试验所用设备为AM356型4.5 kW连续YAG激光器配ABB IRB2400/16型工业机器人焊接系统。

表1 1420铝锂合金化学成分(质量分数)(%)

Mg	Li	Zr	Fe	Si	H	Al
5.0~6.0	1.9~2.3	0.1~0.5	<0.2	<0.1	<0.1	余量

焊接时焊缝分为横焊缝和纵焊缝, 焊后对部分试板进行热处理, 热处理工艺为460 ℃固溶+空冷+120 ℃×10 h。将试板加工成拉伸试件, 在ZWICK100KN电子万能材料试验机上对试件分别进行室温和250 ℃高温拉伸。

2 试验结果及分析

2.1 修饰焊的影响

垂直于母材轧制方向对1420铝锂合金进行激光焊接, 再

- [3] 李 桓. 钨极氩-氮电弧的高热特性[J]. 焊接学报, 1994, 14(2): 125-130.
- [4] Lancaster J F. The Physics of Welding[M]. England: Printed in Great Britain by A Wheaton & Co. Ltd Exeter, 1984.
- [5] [美] 卡尔 L 约翰. Matheson气体数据手册 (原书第7版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [6] Choo R T C, Szekeley J. On the calculation of the free surface temperature of gas tungsten arc weld pools from first principles: part 1. Modeling the Welding Arc[J]. Met Trans B, 1992, 23B(6): 357-369.
- [7] 芦凤桂, 姚 舜, 张毓新. TIG焊接电弧等离子体流场的有限元分析[J]. 焊接技术, 2004, 33(2): 14-16.
- [8] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在ANSYS上的实践[M]. 陕西西安: 西北工业大学出版社, 1999.

作者简介: 李彩辉 (1978—), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事焊接过程控制及电弧数值模拟方面的研究。