

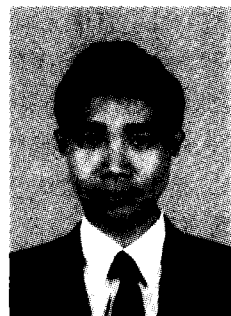
工艺参数对钽薄板小间隙 TIG 对接焊熔池的影响

周方明^{1,2}, 钱乙余¹, 姜泽东², 施一丰²(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 江苏科技大学
材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 为探索薄壁钽焊管生产线焊接成形质量控制方法, 进行了钽薄板小间隙平对接 TIG 氩弧点焊工艺试验和数值模拟技术研究。试验中用 Fastcam 10KC 高速摄像机成功地测定了熔池的动态尺寸。数值模拟采用 ANSYS 有限元分析软件, 建立了焊接系统的三维传热模型, 综合考虑了对接间隙、夹具等的影响, 计算所得熔池动态变化的结果与试验结果较好地吻合。另外, 利用数值模拟方法还进行了工艺参数对熔池形态影响的研究, 结果表明, 对接间隙促进了熔池纵横向宽度的椭圆化。计算获得的熔池形成时间、熔池长大速度、熔池形成率、临界电流等对优化焊接工艺参数具有重要指导意义。

关键词: 钽; 熔池; 小间隙; 数值模拟; 对接焊

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2005)12-43-04



周方明

0 序 言

钽是一种塑性较好、容易制作加工的难熔稀有金属, 对许多酸、乙醇、氯化物、硫化物和其它化学用品都有极好的耐腐蚀性, 是一种重要的战略物资。它广泛应用于化学工业、航天工业、核能工业和电子工业等领域^[1]。随着工业技术的发展, 设备工作的可靠性、免维修性、长寿命等问题越来越受到人们的关注。在化学工程上钽管代替常规的不锈钢管已成历史必然。钽管生产一般有采用挤压、拉拔、旋压、轧制技术生产的无缝管和采用焊接技术生产的有缝管。成本高、效率低、设备复杂的无缝管生产技术正被优势明显的焊接制管技术所取代。钽的焊接一般采用氩(或氦)弧焊。在连续焊管生产中, 焊接速度快、工件壁薄, 并且对接时对接缝存在一定的间隙, 因此焊接过程中极易发生烧穿、驼峰等成形缺陷^[2]。由于钽材珍贵, 缩短试验周期, 减少试验材料消耗, 提高产品质量是迫切需要解决的问题。近年来计算机技术的发展, 尤其焊接数值模拟技术的发展给解决这一矛盾带来了希望^[3]。针对连续对接焊可看作是无数个焊点连成, 若能保证每个焊点的质量, 即能保证对接焊缝的质量。作者基于此, 针对常用钽管用板, 建立了对接点焊数值模拟的物理

与数学模型, 应用 ANSYS 有限元软件进行了仿真, 研究了决定焊缝成形的熔池与主要焊接工艺参数的关系, 从而为控制钽管焊缝成形奠定基础。

关于钽焊接的数值模拟仅有法国的 Girard K^[4]等人针对激光点焊, 根据焊接缺陷的形式, 建立了钽的焊接模拟气孔形成和消失的模型。目前对焊接熔池数值模拟的研究仅限于单板重熔和无间隙对接焊情形^[5]。而间隙的存在影响了电弧形态和工件散热条件, 这势必对焊接熔池产生影响。因此研究间隙条件下对接焊熔池的特征及影响具有重大理论价值和工程实际意义。

1 焊接工艺条件

1.1 试验材料

试验用材料为纯钽, 其物理参数见文献[6]。工件尺寸为 50 mm × 20 mm × 0.5 mm。试验前工件先经校平, 机械方法清除板边缘毛刺, 然后用 (5% ~ 10%) HF + (25% ~ 30%) HNO₃ + (60% ~ 70%) H₂O 的酸溶液清洗并烘干待用。

1.2 试验设备

试验中使用 MAGIC WAVE2600TIG 焊机, 采用直流正接。

熔池测定设备采用 Fastcam Super 10KC 高速摄像机, 拍摄时采用 500 FPS, 光圈 32。

工件定位用专门夹具, 工件正面使用氦气保护,

收稿日期: 2004-10-18

基金项目: 船舶先进设计制造技术江苏省重点实验室资助项目
(KJS02097)

气体流量 7 L/min; 反面采用氩气保护, 气体流量 5 L/min。

2 计算工具及模型

研究采用了有限元分析软件 ANSYS 7.0, 根据有限单元法物体离散化的特点, 对模型进行了相应的数值化处理, 在计算过程中使用了实体单元 solid70 和表面单元 surf152 相结合, 除了施加整体与外界的对流散热条件外还考虑了工件与夹具和保护胎具之间的传热, 并采用非均匀映射网格形式进行单元划分。因为模型的对称性, 计算只选取了对接焊试验中的一块试板进行建模计算。

2.1 网格划分

研究中采用了有限单元法进行数值计算, 单元的形状、单元大小及数量等对整个模型分析的准确性和经济性有决定性的影响。由于模型几何形状复杂, 基于 ANSYS 自适应网格划分技术, 研究采用四面体和六面体单元相结合的网格划分原则, 对工件和夹具进行不同单元形状的网格划分。出于提高计算效率和计算精度的考虑, 模型采用均匀与非均匀网格相结合的方法来进行单元的划分。在对接面及近缝区域, 采用较为细密的网格划分, 以获得较高的单元密度; 而在远离焊缝区, 由于温度梯度比较小, 采用较粗略的网格划分。这样可以兼顾计算精度与速度。

2.2 热源加载

电弧加热区的热能分布按照常用的高斯分布形式, 电弧加热半径内任意一点 $r(x, y)$ 的热流量分布为式(1)、(2)^[7], 即

$$Q(r) = Q_m e^{-kr^2}, \quad (1)$$

$$Q_m = \frac{k}{\pi} \eta UI, \quad (2)$$

式中: Q_m 为加热斑点中心的最大热流; k 为热能集中系数; η 为加热效率, 取值 0.7^[7]; r 为电弧有效加热半径, 取 3 mm^[8]; U 为电弧电压; I 为焊接电流。

2.3 工件与夹具之间的传热过程分析

基于 ANSYS 软件创建实体功能, 分别创建了工件、夹具和保护胎具的实体模型, 并分别进行了物理性能参数的定义(夹具和保护胎具均为纯铝制成), 应用 ANSYS 软件中体粘接功能^[9]。将分散实体粘合成新的统一实体, 此时图元之间在公共边界处相关, 这就使得生成有限元模型后能够进行工件与夹具间的传热分析。

根据实体模型特点, 研究中把工件与夹具和保护胎具间的热交换考虑为传导换热, 具体传热过程

为: 焊接开始后, 高温的工件与低温的夹具和保护胎具间存在着温度差, 热量会从工件传递到夹具和保护胎具上, 根据傅里叶定律^[10]有

$$\frac{Q}{t} = \frac{\lambda A (T_{\text{工件}} - T_{\text{夹具}})}{d}, \quad (3)$$

式中: Q 为时间 t 内的传热量; λ 为导热系数, 在这里纯铝的导热系数为 234 W/(m·K); A 为工件与夹具的接触面积; $T_{\text{工件}}$ 为工件上的温度; $T_{\text{夹具}}$ 为夹具上的温度; d 为两平面之间的距离, 这里认为工件与夹具结合紧密, 所以取夹具的厚度为 7.5 mm。

2.4 对接间隙的处理

由于钎金属的线膨胀系数很小, 工件在电弧作用下膨胀很少, 对接间隙在绝大部分焊接时间内甚至整个焊接过程中都存在, 因而计算时对接面处的边界条件必须采用对流边界条件。另外研究中考考虑到间隙存在时对电弧热效率的影响, 在计算时, 通过对加载热源坐标的控制, 将电弧作用中心加载到对接间隙的中心线上, 因对接间隙的存在, 电弧热量将有一小部分没有作用到工件上, 这样就将因间隙存在而损失的热量考虑在内。

2.5 边界条件的处理

焊接工件的初始温度设为环境温度, 通过在实体单元表面覆盖一层表面效应单元来考虑对流边界条件。

(1) 引弧时刻的初始条件为

$$T = T_0, \quad (4)$$

式中: T 是工件上的温度; T_0 为初始室温 (298 K)。

(2) 计算时将间隙处对接面设为对流边界, 考虑空气在间隙处流通时与工件的对接面产生对流散热。工件其它表面均通过表面单元与空气进行对流散热。对流边界条件为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_0), \quad (5)$$

式中: $\partial T / \partial n$ 为工件上 x, y, z 方向的温度梯度; λ 为材料的导热系数; h 为材料的对流换热系数。

2.6 工件热物理性能参数的处理

在采用 ANSYS 进行数值运算时, 中间涉及到热物理性能参数的数学处理, 计算过程中采用等效导热系数 $\lambda^*(t)$, 等效比热容 $c^*(t)$ 和等效密度 $\rho^*(t)$ 。 $\lambda^*(t)$ 、 $c^*(t)$ 、 $\rho^*(t)$ 的计算与文献[11]相同。为简化计算, 假设在两相区内, 导热系数和液相密度随温度呈线性变化。由于钎金属的固相线温度与液相线温度相同, 均为 3 269 K, 计算时将两温度差设置为 1 K。

3 熔池计算及试验验证

无间隙对接焊时,焊缝中心采用绝热边界条件来计算^[8]。而有对接间隙存在时,焊缝中心必须采用对流换热边界条件。采用 ANSYS 软件计算熔池的结果示于表 1。

表 1 两种边界条件下 x、y 方向熔宽 (mm)
Table 1 Weld width in x and y direction under two kinds of boundary conditions

焊接 时间 t/s	实测值		计算值 (对流边界)		计算值 (绝热边界)	
	x	y	x	y	x	y
0.3	2.05	2.05	1.95	2.0	1.98	2.15
0.5	2.75	3.0	2.90	3.15	2.95	3.25
0.7	3.2	3.8	3.30	3.75	3.34	3.9
0.9	3.4	4.1	3.45	4.2	3.49	4.28
1.1	3.5	4.6	3.62	4.8	3.65	4.85

注:工艺参数为板厚 0.5 mm;间隙 0.09 mm;电流 75 A;电压 17.4 V。

从表 1 熔池计算结果与试验测量结果比较可以看出,两者吻合较好,反映出该研究所采用的熔池计算方法可行的。

表 1 中对流边界条件与绝热边界条件的计算结果比较表明,对接间隙的存在增加了电弧功率的损失,从而减小了熔池的尺寸。

4 焊接工艺参数对熔池的影响

4.1 电弧加热时间对熔池的影响

表 1 计算结果示于图 1。由图可看出,在间隙 0.09 mm、电流 75 A、电压 17.4 V 的工艺条件下,钽薄板在 TIG 电弧引燃后 0.12 s 开始形成熔池,熔池宽度以约 6.25 mm/s 的速度长大,在 0.3 s 以前熔池在 x、y 方向上大小均匀生长,0.3 s 以后熔池在 y 方向上长大速度高于 x 方向,在 0.5 s 时熔宽(x 方向)达到最大而稳定。这是因为间隙过小对电弧形态影响不大,而在加热初期冷态工件有较强的散热能力,使焊缝中心即工件对接边缘处也有与夹具一样较好的散热作用,使得熔池在 x、y 方向能均匀生长。在 0.3 s 后工件上尤其是对接边缘处的温度显著升高, y 方向上焊接熔池的冷却速度随加热时间延长而降低, x 方向因夹具导热性好、热容量大,在 0.3 s 的焊接加热时间内不会对熔池冷却速度产生较大的降

低,从而使熔池呈现椭圆化,加热时间越长椭圆就越扁。

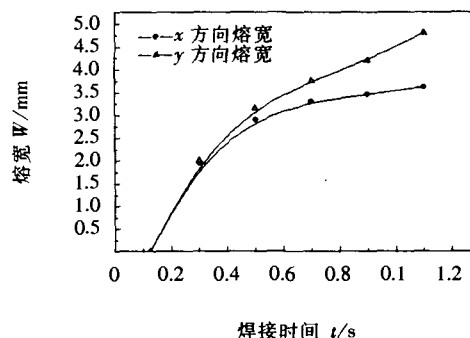


图 1 焊接时间对熔宽的影响

Fig. 1 Effect of welding time on weld width

(工艺条件:板厚 0.5 mm;间隙 0.09 mm;电流 75 A;电压 17.4 V)

4.2 焊接电流对熔池的影响

图 2 为对接间隙 0.09 mm 时, TIG 焊焊接电流对熔池影响的计算结果。图 2 表明对于 0.5 mm 板厚的钽薄板在 TIG 焊时,电流只有达到 33 A 以上才能形成熔池,此临界电流只与热源性质及工件材质、板厚及散热条件有关,而与焊接时间无关。随着焊接电流的增大,熔池约以 0.14 mm/(A · s) 的形成率线性增大。这是因为在焊接时间一定时,焊接电流增加,据式(2)可知电弧功率 IU 显著增大,工件吸收热量增大,从而使熔池宽度增大。

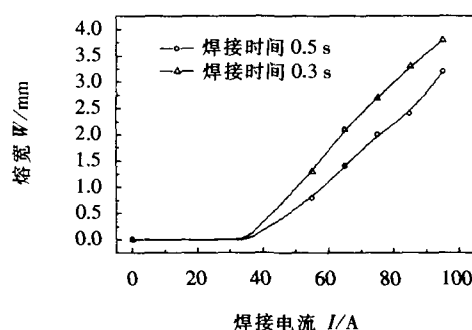


图 2 焊接电流对熔池宽度(x 方向)的影响

Fig. 2 Effect of welding current on weld width

(工艺条件:板厚 0.5 mm;间隙 0.09 mm)

4.3 对接间隙对熔池的影响

图 3 是焊接电流 75 A,焊接加热时间 0.25 s 时,对接间隙对熔池形态影响的计算结果。结果表明在对接间隙为零时,焊接熔池在 x、y 方向上大小一致,一旦有对接间隙出现,熔池在 y 方向随间隙增大而表现出先增大后减小的趋势;熔池在 x 方向随

间隙增大始终减小。这是因为在较短的焊接时间内,若无对接间隙,则工件 x 、 y 方向上的散热功率相近,因此在两方向上形成的熔池尺寸也一致。随着对接间隙的出现,电弧输入功率变化不大,而因间隙存在使间隙处发生对流而耗散的功率却增加,工件 x 方向散热条件未变,而 y 方向上呈现的板边缘效应,使得散热速度降低。 x 方向熔池随着间隙增加而单调降低; y 方向在间隙变化初期,因边缘效应出现使得散热速度降低强度高于因间隙增大引起的对流散热增加强度,使熔池增大,在间隙达到 0.05 mm 以后板边缘效应趋于稳定,而间隙引起的对流散热继续增加,使熔池也像 x 方向一样呈现减小趋势。

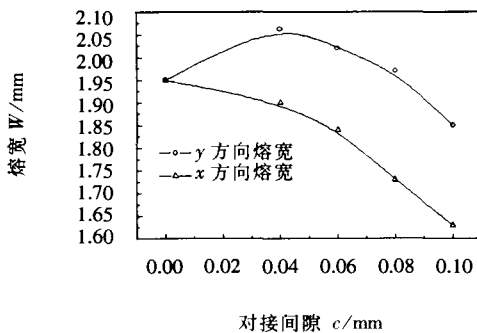


图3 对接间隙对熔池宽度的影响

Fig.3 Influence of butting gap for Weld width

(工艺参数:板厚 0.5 mm;电流 75 A;电压 17.4 V;焊接时间 0.25 s)

5 结 论

(1) 根据有限单元法物体离散化的特点,对模型进行了相应的数值化处理,在计算过程中使用了实体单元 solid70 和表面单元 surf152 相结合的方法。除了施加整体与外界的对流散热条件外还考虑了工件与夹具和保护胎具之间的传热,并采用非均匀映射网格形式进行单元划分,使得计算时间缩短而且提高了计算的精度。

(2) 针对钽薄板 TIG 焊接工艺的特点建立了焊接传热系统的物理与数学模型,经数值化处理所

得理论计算结果与试验实测结果吻合较好。

(3) 对接间隙的存在降低了电弧加热效率,并引起了对接缝处加热的边缘效应,促进了焊接熔池表面形态的椭圆化,间隙越大,椭圆越扁。

(4) 利用数值模拟技术获得了熔池形成时间、熔池长大速度、熔池形成率、临界电流等控制焊缝成形的关键因素,这对优化焊接工艺参数,控制焊接质量具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 顾钰熹. 特种工程材料焊接[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1998.
- [2] Mendez P F, Eager T W. Penetration and defect formation in high-current arc welding[J]. Welding Journal, 2003, 82(10): 296-305.
- [3] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [4] Girard K, Jouvard J M, Naudy Ph. Study of voluminal defects observed in laser spot welding of tantalum[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(21): 2815-2824.
- [5] 蔡洪能, 唐慕尧. TIG 焊接温度场的有限元分析[J]. 机械工程学报, 1996, 132(2): 34-39.
- [6] 夏耀勤. 钽(工业纯钽)[J]. 稀有金属材料与工程, 1989, 000(002): 77-79.
- [7] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
- [8] Zhou F M, Yu Z S, Feng Y H, et al. Numerical analysis of the heat-transfer process for double-sided TIG-MIG weld pool[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8(1): 76-79.
- [9] 李皓月, 周田朋, 刘相新. ANSYS 工程计算应用教程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [10] 唐兴伦, 范群波, 张朝晖, 等. ANSYS 工程应用教程——热与电磁学篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [11] 陈海清. 铸件凝固过程数值模拟[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.

作者简介: 周方明,男,1964 年出生,副教授,博士研究生。研究方向为焊接设备与工艺、焊接数值模拟与质量控制,发表论文 20 余篇。

Email: zhoufangm@263.net