文章编号: 1004-0609(2008)04-0693-05

## 5A12 铝合金有限宽薄板钨极惰性气体焊接的数值模拟

王 蕊,刘 川,张建勋

(西安交通大学 材料科学与工程学院, 西安 710049)

摘 要:针对铝合金 5A12 有限薄板钨极惰性气体(TIG)焊接过程存在非准稳态的特点,提出了考虑热源预热作用 及移动效应的二维高斯热源修正模型,并采用修正的二维高斯热源模型对其焊接热过程、焊接残余角变形和纵向 残余应力进行数值模拟及研究,同时比较数值模拟及实验结果。实验结果表明:利用修正的二维高斯模型能较好 地反映有限薄板的焊接特点,所计算的接头熔合区形状、热循环曲线与实验结果吻合良好。焊接残余角变形及焊 接纵向残余应力也得到了与实验值较接近的模拟结果。利用此修正的二维高斯模型可提高焊接温度场、焊接纵向 残余应力与变形数值模拟的准确性。

关键词: 热源模型; 有限尺寸; 预热; 残余应力; 残余变形 中图分类号: TG 456.7 文献标识码: A

# Numerical simulation of tungsten inert gas welding of 5A12 aluminum alloy limited size sheet

#### WANG Rui, LIU Chuan, ZHANG Jian-xun

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The characteristics of the quasi-steady-state during tungsten inert gas (TIG) welding process on 5A12 aluminum alloy sheet with limited size were analyzed. The welding process, residual angular deformation and longitudinal residual stress were numerically simulated and studied using the modified two-dimonsional Gaussian heating source model. The numerical simulation results were compared with experimental results. The results show that the numerical results by the modified two-dimensional Gaussian model reflect well the limited plate welding characteristics. The shape of joint fusion zone and thermal cycle curve calculated agree well with the experimental results. And the welding residual deformation and longitudinal welding residual stress are closer with the experimental value of the simulation results. The welding temperature field, welding longitudinal residual stress and deformation can be simulated accurately using the modified two-dimensional Gaussian model.

Key words: heating source model; limited size; preheating; residual stress; residual deformation

焊接温度场不仅反映焊接过程的复杂性,还间接 决定了焊接残余应力与变形,影响到熔合、裂纹、组 织等与焊接质量有关的指标。采用有限元方法,在计 算机上进行焊接过程的数值模拟,可以在较短的时间 内获得不同参数条件下温度场分布残余应力场和残余 变形,使焊接过程的准确模拟成为可能<sup>[1-2]</sup>。

对于工程实际问题,三维数值模型由于数据量大、 计算周期长,而限制了其发展,许多学者仍采用二维 模型进行计算,在保证计算精度的同时提高计算效 率<sup>[3-4]</sup>。作者提出采用二维广义应变模型能够有效模拟 T型接头的残余应力和角变形<sup>[5]</sup>,模拟了有限尺寸铝 合金2024 钨极氩弧焊接过程,并获得低应力无变形焊 接试板<sup>[6]</sup>。ZHU等<sup>[7]</sup>采用二维模型研究了材料属性对 焊接变形的影响,提出对变形影响较小的物理参数计 算中可简化。UEDA等<sup>[8]</sup>采用二维有限元模型研究了 局部加热、焊接顺序、初始应力和焊接间隙等因素

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475093);现代焊接生产技术国家重点实验室基金资助项目

收稿日期: 2007-07-10; 修订日期: 2007-12-02

通讯作者: 张建勋, 教授, 博士; 电话: 029-82668807; E-mail: jxzhang@mail.xjtu.edu.cn

对焊接变形的影响。ABID 等<sup>[9-10]</sup>对管和法兰盘的焊接 温度场、变形和残余应力进行了计算,并比较了二维 和三维模型各自的优缺点。

但如何准确的通过二维模型描述瞬时移动热源, 并计算相对准确的瞬时温度、应力和变形,仍然是焊 接过程数值模拟重要的研究课题之一。在采用二维模 型进行计算时,根据焊接的特点,热过程可以分为 4 个阶段:预热、加热、传热及冷却。SARKANI等<sup>[11]</sup> 考虑焊接过程各主要部分的影响,寻找有效计算 T 型 焊接接头的残余应力的方法。FERRO 等<sup>[12]</sup>研究相变 对 SA516 钢焊接残余应力的影响。提出在焊接速度较 高及材料热导率较低的情况下,三维模型和二维模型 的计算结果吻合更好。

## 1 5A12 铝合金非准稳态焊接

图 1 所示为宽度为 160 mm 的 5A12 铝合金 TIG 焊接试板的宏观焊缝照片。由图 1 可看出,当焊接规 范保持不变时,焊缝上各点的宽度不同。这是由于焊 接电弧对后续焊接部位的预热作用。当焊接件尺寸 很大时,这一作用会达到平衡,也就是所谓的准稳 态,但对于有限尺寸板的焊接,很难达到准稳态。



图 1 预热作用对焊缝成型的影响 Fig.1 Effect of preheating on welding shaping

在焊接过程进入准稳态后,随热源的移动,焊接 温度场及熔池形状均不随时间改变,表现为等温线的 范围不再随时间增大,而只是随热源的移动而移动。 图 2 所示为有限宽度薄板焊接二维热流分布<sup>[13]</sup>。



图 2 薄板焊接二维热流分布

Fig.2 Two-dimensional heat flow distribution of thin work piece during welding

根据移动线热源传热过程计算式(1),能够计算相 对于移动热源试板上任何一点 *p*(*x*, *y*)所对应的温 度<sup>[14]</sup>。即通过假设某一等温线温度,即可求出等温线 最宽点(图 2 所示 *y* 值)来判断试板是否进入准稳态。

$$\frac{2\pi(\theta - \theta_0)\lambda\delta}{Q} = \exp\left(\frac{vx}{2\alpha}\right)k_0\left(\frac{vl}{2\alpha}\right)$$
(1)

式中  $\theta$ 为温度,  $\mathbb{C}$ ;  $\theta_0$ 为焊前试板温度,  $\mathbb{C}$ ;  $\lambda$ 为试 板热导率, W/(m·K);  $\delta$ 为试板厚度, m; Q为焊接热 输入, W; v 为热源移动速度, m/s;  $\alpha$  为试板热扩散 系数;  $k_0$ 为修正贝塞尔函数; l为热传输距离, m, 表 示为( $x^2+y^2$ )<sup>1/2</sup>。

根据试板焊接的实际情况,取温度为 50 ℃时,  $\theta_0$ =20 ℃;  $\lambda$ =118 W/(m·K);  $\delta$ =5 mm; *P*=560 W; *v*=10 cm/min;  $k_0$  可查表求得; 通过计算求得 50 ℃等温线最 宽点(*x*=0 mm, *y*=133 mm), *y* 值大于试板半宽 80 mm。 由图 1 熔池的几何形状不均匀性及式(1)的计算结果能 够说明,对于有限尺寸的铝合金薄板在焊接过程中存 在非准稳态现象。

本文作者针对有限铝合金薄板的 TIG 焊接过程存 在非准稳态现象特点,提出采用修正的二维有限元模 型对焊接过程温度场、焊接残余应力和焊接残余变形 进行全面的数值模拟研究,并通过对比实验来验证修 正模型模拟结果的准确性。

## 2 计算模型

## 2.1 热源模型

根据 TIG 焊接过程电弧加热的特点,采用高斯函数来描述焊接热源在一定范围内的分布。其函数表达式为:

$$q(x,y) = \frac{3P}{\pi r^2} \exp\left(\frac{-3x^2}{r^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{r^2}\right)$$
(2)

式中 *r* 为电弧有效加热半径; *x*, *y* 为平面坐标; *P*=η*UI*, 为电弧功率, W; η 为焊接热效率; *U* 为电弧 电压, V; *I* 为焊接电流, A。

式(2)中所建立的热源模型,在二维有限元数值模 拟过程中,热源施加在垂直焊缝的中截面平面,忽略 纵向热流,这种假设在有限尺寸铝合金试板,焊接速 度较慢时会产生很大误差。

基于前面的分析,在有限尺寸试板上进行铝合金 焊接,预热过程是焊接温度场分布的重要影响因素。 为了通过二维模型准确模拟实际焊接温度场的分布情 况,需对模型进行修正<sup>[11]</sup>。

$$q(x,t) = \alpha \frac{3P}{\pi r^2} \exp\left(\frac{-3x^2}{r^2}\right) \exp\left(\frac{-3(v(t-\tau))^2}{r^2}\right)$$
(3)

式中 v 为热源移动速度, m/s; τ 为熔池中心移至研 究平面的时间; 其中 α 为预热系数, α 值与焊枪到研 究平面的距离倒数的平方(1/vt)<sup>2</sup>成正比, α 为随时间和 焊接速度变化的量。

修正式(3),在焊接方向上的电弧热流分布可以通 过焊接速度和时间来表示。通过系数 α 考虑电弧移动 效应以及焊接电弧对所研究平面的预热作用。

#### 2.2 物理模型

模拟计算中采用的材料为铝合金 5A12,试件尺寸 为 200 mm×60 mm×5 mm,采用 TIG 焊接方法。实际 模型简图如图 3 所示。 焊接规范参数: 电流 100 A; 速度为 10 cm/min; 氩气流量为 9.5 L/min; 电压为 14 V。



图 3 实验系统布局示意图

Fig.3 Schematic diagram of experimental layout

## 2.3 有限元模型

本研究所建立二维平面应变模型进行温度及应力 计算。材料的热物理性能参数见文献[15]。除了电弧 所在的圆面加热流密度外,其他表面为对流换热表面, 初始温度设定为室温 20 ℃。通过式(4)<sup>[16]</sup>来确定焊接 过程的对流换热系数。

$$H = 2.2(\theta_{\rm w} - \theta_{\rm c})^{0.25} + 4.6 \times 10^{-8} \times (\theta_{\rm w}^2 + \theta_{\rm c}^2)(\theta_{\rm w} + \theta_{\rm c})$$
(4)

式中 *H*为对流系数; θ<sub>w</sub>为工件温度; θ<sub>c</sub>为环境温度。 以垂直于焊缝的平面建立模型,网格模型如图 4 所示。采用过渡网格划分技术进行划分。为简化计算, 并考虑焊接实验中焊缝宽度的最大值,取焊缝宽度为 6 mm,距焊缝处 10 mm 宽范围内的网格比较密,而 远离焊缝处的网格稀疏,逐渐实现到母材的过渡。根 据实验装夹情况,在试板一侧上下表面采用位移约束。



Fig.4 Finite element mesh model of welding

在模拟计算时,焊接热效率 η=70%;电弧电压 U=14 V;焊接电流 I=100 A;电弧有效加热半径 R= 3 mm;焊接速度 v=10 cm/min。整个焊接过程共用 95 s 完成,设置自动时间步长以保证求解的稳定性和 精确性。利用 ANSYS 有限元分析软件进行计算。

## 3 结果与分析

## 3.1 温度场模拟结果

图 5 所示为采用修正二维高斯热源模型所建有限 元计算程序获得的焊接接头温度场分布云图与焊缝接 头宏观照片对比。从图 5 中可看出,数值模拟获得的 温度场分布与焊接头温度场分布一致。熔合区形状与 实验结果基本一致,与正常焊接条件下的熔化区截面 形状相符。温度场模拟结果与实验结果吻合良好。



## 图 5 温度场数值模拟与实验结果对比

**Fig.5** Comparison of numerical simulation results(a) with experimental results(b) of temperature field

图 6 所示为距焊缝中心 5 mm 处试板底部的热循 环变化曲线、数值模拟结果和实验结果对比。从图 6 中可看出,试板底部热循环曲线为缓升缓降过程。由 于存在预热行为,温度上升较为缓慢,达到峰值 后,在外界环境作用下缓慢下降至室温,达到温度平 衡。未修正二维高斯热源模型,由于未考虑热源的移 动效应及焊缝周围区对焊缝的预热作用。因此,在加 热阶段温度陡升。在达到峰值后,在外界环境作用下 温度缓慢下降至室温达到温度平衡。



图 6 距焊缝中心 5 mm 试板底部的热循环曲线结果比较 Fig.6 Comparison of numerical results with experimental values of temperature curves at 5 mm away from weld

采用修正模型计算距焊缝中心 5 mm 试板底部 获得的热循环曲线与实验测得的热循环曲线基本吻 合。数值模拟热循环曲线峰值温度小于实验测得结果, 在降温过程中修正后模型数值模拟结果与实验结果趋 于一致。

通过对高斯热源进行修正,在二维有限元模拟过 程中考虑热源的移动效应及焊接电弧对所研究平面的 预热作用,能够比较准确的模拟焊接热过程,减小计 算误差。

#### 3.2 残余变形模拟结果

图 7 所示为焊接残余变形数值模拟结果和实验结 果对比。从图 7 中可看出,通过修正的模型能够准确 模拟焊接试板残余角变形。越靠近试板边缘测点,数 值模拟结果与实验结果存在误差越小,模拟结果更加 准确。

采用二维模型和位移约束计算,残余变形计算值 与测量结果符合较好。当焊接结束,由于焊缝各处的



图 7 残余角变形数值模拟与实验结果比较



温差小,因此焊缝处的温度相对于其他区域处于高温,整个焊缝整体冷却,相互之间的收缩制约作用小,因此,二维模型残余变形计算值受其他截面的影响不大,故残余变形计算值和测量值符合较好。

## 3.3 残余应力模拟结果

图 8 所示为垂直焊缝截面纵向应力数值模拟结果 和实验结果比较。残余应力采用盲孔法测量,为简化 工作,以焊缝中心为对称单向测量,并将结果沿对称 中心映射。从图 8 中可看出,试板纵向残余应力在焊 缝区存在较大拉应力,在远离焊缝区存在压应力。未 进行修正的数值模拟的焊缝及熔合区拉应力分布及峰 值远大于实验值。通过修正后模型垂直焊缝截面纵向 残余应力峰值及分布趋势与实验值吻合较好。





Fig.8 Comparison of numerical simulation results with experimental results of longitudinal residual stress

## 4 结论

1) 提出了考虑热源预热作用及移动效应的二维 高斯热源修正模型描述有限薄板的 TIG 焊接热过程。

 2) 采用修正的热源模型计算的焊接接头熔合区 形状与热循环曲线和实验结果吻合良好。

 3)采用修正的热源模型能够比较准确地模拟焊 接残余角变形及焊接纵向残余应力。

## REFERENCES

- MICHALERIS P, SUN X. Finite element analysis of thermal tensioning techniques mitigating weld buckling distortion[J]. Welding Journal, 1997, 76(11): 451–457.
- [2] 蔡志鹏, 赵海燕, 鹿安理. 结合模型试验的数值模拟方法在 大型结构焊接变形控制中的应用[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 100-103.

CAI Zhi-peng, ZHAO Hai-yan, LU An-li. Welding distortions of huge structures controlled accurately through the numerical method combined with model experiment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10): 100–103.

- [3] 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, 32(2): 34-39.
  CAI Hong-neng, TANG Mu-yao. The finite analysis of TIG welding temperature field[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1996, 32(2): 34-39.
- [4] DONG P. Residual stress analysis of a multi-pass girth weld: 3-D special shell versus axisymmetric models[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2001, 123(2): 207–213.
- [5] MA Ning-xu, UEDA Y, MURAKA H, MAEDA H. FEM analysis of 3-D welding residual stress and angular distortion in T-type fillet welds[J]. Transactions of the JWRI, 1995, 24(2): 115–122.
- [6] PRESTON R V, SHERCLIFF H R, WITHERS P J, SMITH S D. Finite element modeling of tungsten inert gas welding of aluminium alloy 2024[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8(1): 10–18.
- [7] ZHU X K, CHAO Y J. Effect of temperature-dependent material

properties on welding simulation[J]. Computers and Structures, 2002, 80(11): 967–976.

- [8] UEDA Y, MURKAWA H, GU Si-mei, OKUMOTO Y, KAMICHIKA R. Simulation of welding deformation for precision ship assembling (Report I)—in-plane deformation of butt welded plate[J]. Transactions of the JWRI, 1992, 21(2): 265–275.
- [9] ABID M, SIDDIQUE M, MUFTI R A. Prediction of welding distortions and residual stresses in a pipe–flange joint using the finite element technique[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005, 13(3): 455–470.
- [10] ABID M, SIDDIQUE M. Numerical simulation to study the effect of tack welds and root gap on welding deformations and residual stresses of a pipe-flange joint[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005, 82(11): 860–871.
- [11] SARKANI S, TRITCHKOV V, MICHAELOV G. An efficient approach for computing residual stresses in weld joints[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000, 35(3): 247–268.
- [12] FERRO P, PORZNER H, TIZIANI A, BONOLLO F. The influence of phase transformations on residual stresses induced by the welding process-3D and 2D numerical models[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2006, 14(2): 117–136.
- [13] KOU S. Welding metallurgy[M]. 2nd ed. Canada: A John Wiley&Sons, Inc, 2003: 49.
- [14] RYKALIN N N. 焊接热过程计算[M]. 北京: 机械工业出版 社, 1958.
   RYKALIN N N. Computation of welding heat transfer process[M]. Beijing: Mechanical Press, 1958.
- [15] 中国航空材料手册编辑委员会.中国航空材料手册(第 3 卷) 铝合金、镁合金系列[M].北京:中国标准出版社,2002.
  China Aviation Materials Handbook Editional Board. China Aviation materials handbook (Vol. 3) Aluminum alloy, magnesium alloy series[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [16] FANG Hong-yuan, MENG Qing-guo, XU Wen-li, JI Shu-de. New general double ellipsoid heat source model[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(3): 361-368. (编辑 李艳红)