

预拉伸条件下铝合金焊接残余应力的数值模拟

李敬勇, 刘志鹏, 王虎, 陆亚明

(江苏科技大学 江苏省先进焊接技术重点实验室, 江苏 镇江 212003)

摘要: 利用 ANSYS 有限元分析软件, 通过 APDL 语言编程, 实现了不同预拉伸应力条件下铝合金平板对接焊过程中, 温度场及应力场的模拟分析。计算结果表明, 预拉伸焊接法可以有效地控制焊接残余应力, 随着预拉伸应力的增大, 其焊后残余应力值逐渐减小。当预拉伸应力 σ_p 从 0 增加到 90% $\sigma_{0.2}$ 时, 纵向残余应力降低了 85.6%。模拟分析结果与实验测试结果基本吻合。

关键词: 铝合金; 预拉伸; 残余应力; 数值模拟

中图分类号: TG404 TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2008)05-0059-05

焊接构件中复杂的残余应力状态可能直接或间接地减少构件的承载能力, 特别是焊道区域高的拉伸应力是导致焊接接头脆性断裂的根源, 并可能致使其疲劳强度恶化、减小构件的稳定性。因此, 焊接残余应力一直是国内外焊接学术界和工程界关注和研究的热点问题之一^[1-3]。由于铝合金的弹性模量小、线膨胀系数大, 且高温塑性差, 因此, 其焊接结构, 特别是铝合金薄壁构件, 焊接时产生的热应力及焊后残余应力和失稳变形问题尤为突出。

预拉伸焊接法通过定量设置预加拉应力所形成的应力场与由温度场引起的应力场相叠加, 改变试件内应力应变的分布状况, 可以达到能动地控制焊接应力与变形的目的^[4,5]。本课题组采用预拉伸焊接法, 通过实验方法有效地实现了对铝合金焊接试板纵向残余应力的控制, 焊接试板的纵向挠曲变形和平面变形也均大幅减小^[6]。由于计算机模拟技术有其独特的优越性^[7], 本文作者运用大型有限元 ANSYS 模拟软件对铝合金薄板在预加应力下的焊接温度场、应力场和应变的现象和过程进行数值模拟, 大大减少了实验工作量。通过对计算结果进行分析及与实验结果对比发现, 模拟计算结果与实验测定结果基本吻合, 从而为实际工程应用中预加应力大小的设置提供了准确的数据支持, 可用于实际预拉伸焊接工艺的优化。本文重点介绍预拉伸条件下铝合金焊接残余应力的数值模拟结果。

1 焊接过程数值模拟的基本理论方程

产生焊接残余应力和变形的根本原因是焊接过程中由于局部的热输入而导致的不均匀温度场。焊接温度场所引起的动态应力应变过程是一个复杂的三维热弹塑性问题。温度场和应力场的作用相互耦合, 给求解带来很大难度。本文采用间接偶合法, 先进行温度场计算, 然后将求出的因温度变化引起的热应力作为体载荷加在结构中做应力场分析。在应力场求解过程中, 还考虑了材料参数随温度的变化。

1.1 焊接温度场热传导控制方程

焊接温度场受到诸如焊接电源、焊接速度、焊接材料尺寸、边界条件和材料的热物理特性等的影响, 因此, 焊接温度场分析属于典型的非线性瞬态热传导问题, 进行焊接温度场的分析计算必须综合考虑以上各因素的影响。三维温度场非线性瞬态热传导问题的控制方程为^[8]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

式中: $Q(x, y, z, t)$ 求解区域 V 中的内热源强度; T 温度场分布函数; λ 导热系数; ρ 和 c 分别为材料的密度和比热。

上式为泛定方程, 为了获得定解, 需要给出微分方程的边界条件及初始值。

1.2 热弹塑性应力应变关系理论方程

从本质上说, 焊接区域因承受不均匀的加热和冷却过程而产生的不协调塑性应变是造成焊接残余

收稿日期: 2008-03-27; 修订日期: 2008-07-14

作者简介: 李敬勇 (1963—), 男, 博士 教授, (E-mail) jingyong_l@126.com.

应力和变形的根源。焊接应力应变场存在着材料非线性性和几何非线性等问题, 考虑到焊接热应力过程的复杂性, 通常把焊接热应力场看作材料非线性瞬态问题, 选用弹塑性力学模型, 用增量理论进行计算。材料处于弹性或塑性状态的应力应变关系为^[8]:

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon\} - \{C\} dT$$

式中, $[D]$ 为弹性或弹塑性矩阵, $\{C\}$ 为与温度有关的向量。

在弹性区: $\{D\} = \{D\}$

$$\{C\} = \{C\}_e = [D]_e \left\{ \alpha + \frac{\partial [D]_e^{-1}}{\partial T} \{ \sigma \} \right\}$$

式中, α 为线膨胀系数, T 为温度。

在塑性区: $f(\sigma) = f_0(\varepsilon_p, T)$

式中, f 为屈服函数, f_0 为与温度和塑性应变有关的屈服应力的函数。

2 有限元分析过程

有限元模拟分析所采用的材料为 5A05 铝合金板材, 试板的厚度为 4mm, 尺寸为 220mm × 110mm, 采用手工 TIG 对接焊, 参考采用的焊接电流为 120A, 电弧电压为 13V, 焊接速度为 2mm/s, 焊接热效率 $\eta = 0.7$, 电弧有效加热半径 $R = 6\text{mm}$ 。

焊接残余应力主要由焊接过程中不均匀热循环作用引起, 所以焊接瞬态温度场的计算是进行焊接残余应力分析的前提, 将瞬态温度场得到的节点温度作为体载荷施加到结构的应力分析中去, 便可以了解焊接过程中的瞬态应力场及最终的残余应力。预拉伸控制铝合金焊接残余应力的有限元分析共分为两个步骤: 一是模拟无预加应力条件下焊接冷却过程中焊缝区域收缩变形, 并产生残余应力的过程; 二是模拟预拉伸载荷作用后, 残余应力的减小过程。利用 APDL (ANSYS 参数化程序设计语言) 编写完成残余应力的模拟过程, 其计算流程如图 1 所示。

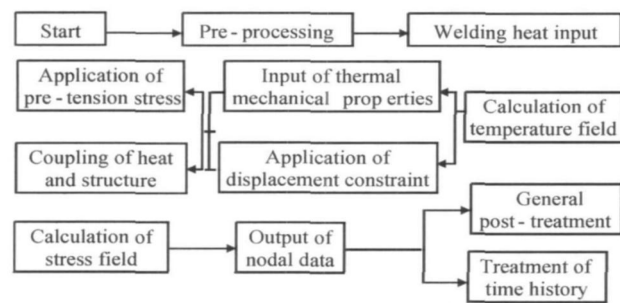


图 1 有限元分析流程图

Fig. 1 Finite element analysis flow chart

2.1 有限元分析模型的建立

焊接过程中, 温度随时间和空间急剧变化, 温度梯度很大, 为了保证计算精度, 在焊缝及其附近区域划分了较密的网格, 定义网格尺寸为 2mm, 而在远离焊缝的区域网格划分则较粗, 定义尺寸为 8mm。热分析中采用六面体单元 solid70 完成热分析后用 etchg 命令直接转换成相应的结构分析单元 solid45。

金属材料的热物理性能 (如比热, 密度等) 随温度变化而变化, 由于焊接试板各区域温度的不同, 其热物理性能存在很大差异, 如果不考虑材料热物理性能随温度的变化, 计算结果将与真实情况产生一定的偏差, 因此, 必须在前处理中建立随温度变化的热物理性能参数库。利用 mptemp 和 mpdata 命令建立材料随温度变化的参数库, 给出有代表性的几个温度下的值, 其余温度下的值则由自动线性插值求得, 更高温度下的值由外推法求得^[9]。

2.2 移动热源模型加载

焊接时, 电弧热源把热能传给焊件是通过一定的作用面积进行的, 这个面积上热量分布是不均匀的, 中心多而边缘少。对于手工钨极氩弧焊, 本研究采用高斯数学模型来近似描述热流密度的分布^[10], 即

$$q(r) = q_m \exp\left(-3\frac{r^2}{R^2}\right) \quad (3)$$

式中: q_m 为加热斑点中心最大热流密度; R 为电弧有效加热半径, r 为 A 点离电弧加热斑点中心的距离。

模拟热源的移动是利用 ANSYS 软件的函数加载功能, 在每个载荷步内, 以热源中心点为中心, 按高斯热源的变化在面上加载, 随着热源的移动每个载荷步内的中心点也相应改变, 这样通过控制中心点使其随时间变化。

2.3 边界条件设置

焊件边界与周围介质进行换热, 热量的散失主要通过热辐射和对流换热方式进行, 高温下散失的热量以辐射为主, 低温下则以对流为主。在模型的对称面处取绝热边界条件, 在其它面上都加载随温度变化的对流, 辐射以加大对流系数的方式来体现。

为了分析预拉伸应力对焊接残余应力的影响, 应力的模拟分两步进行: 在无预拉伸应力时, 位移约束防止计算中产生刚性位移又不能严重阻碍焊接过程中应力自由释放和自由变形, 故在焊接起点施加 X, Y, Z 方向位移约束, 在焊缝面施加对称约束。在计算预拉伸条件时, 在垂直于焊缝的一个面加焊缝方向的位移约束, 另一个面施加预拉应力, 待焊接

完毕后卸载预拉应力。

3 结果与分析

3.1 焊接温度场分布特征

图 2 为焊接过程持续 55s 时试板表面的温度分布云图。图 3 绘出了焊缝中心线上分别距焊接起点 2mm, 55mm, 110mm, 165mm, 220mm 处各点的温度变化历程。可以看到, 当热源移动到某点时, 该点的温度迅速上升, 之后则迅速下降, 温度上升速度明显比温度下降速度快。横向距焊缝中心 16mm 处各相应点的温度变化趋势与图 2 完全相同, 只是其峰值温度显著降低, 且升温 and 降温速率也明显变缓。



图 2 焊接过程持续 55 秒时温度分布云图
Fig. 2 Nephogram of temperature distribution at 55th second of welding process

图 4 为试板同一横截面上分别距焊缝中心 0mm, 8mm, 24mm, 68mm, 110mm 处表面温度变化历程。与焊缝中心线上温度变化一样, 温度上升的速度明显比温度下降的速度快, 离焊缝较远处受热源的影响明显小于离焊缝较近处。由于热传导的缘故, 各点的最高温度随着焊缝中心距离的增大而逐渐减小。

3.2 无预加应力条件下残余应力分析结果

图 5 图 6 分别是试板横向距焊缝中心不同距离处纵向应力和横向应力随时间变化的曲线。可

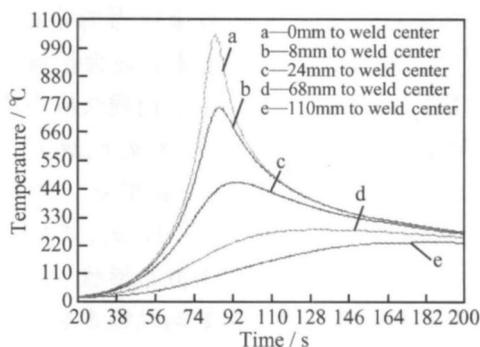


图 4 宽度方向各点温度变化趋势图
Fig. 4 Tendency of temperatures changing in the width direction of the sample

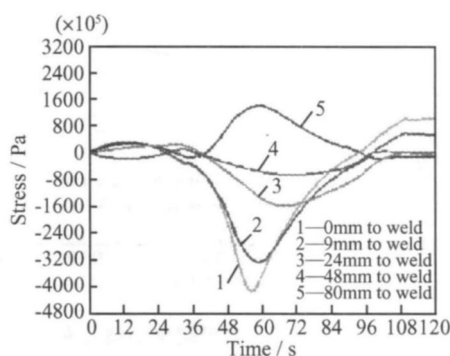


图 5 距焊缝不同距离各点纵向应力随时间变化曲线
Fig. 5 Longitudinal stress distributions at different distances from weld versus time

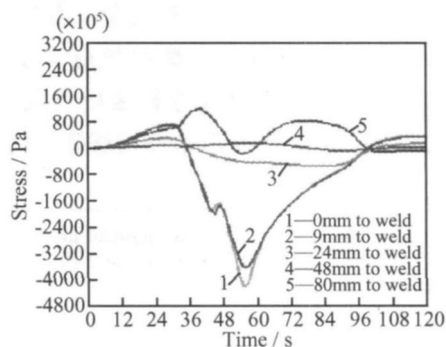


图 6 距焊缝不同距离各点横向应力随时间变化曲线
Fig. 6 Transverse stress distributions at different distances from weld versus time

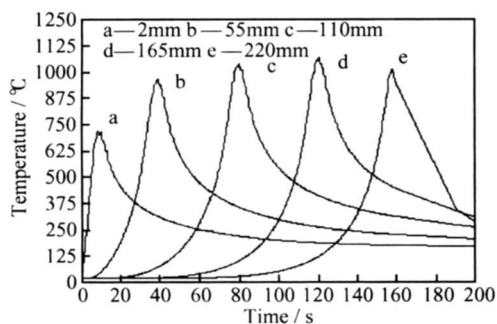


图 3 焊缝上各点温度随时间变化曲线
Fig. 3 Temperature distribution on the weld center versus time

见, 焊接过程中焊件上各点的应力变化非常复杂, 即使各点温度趋于稳定, 应力仍产生了一定的变化, 说明变形协调原则对应力分布有很大影响。焊接结构件作为一个整体, 各区域间相互作用比较复杂, 距焊缝较远区域也存在应力的变化, 不过, 距焊缝较远处的应力变化没有焊缝附近应力变化那么剧烈。随着时间的推移, 当焊件逐渐冷却时, 各点的应力趋于稳定。

焊缝中心线上纵、横向残余应力的分布如图 7 所示。可见,纵向残余应力整体表现为拉应力。焊缝的两端部,由于是自由边界,纵向残余应力值基本为零。随着离开端面的距离不断增加,纵向残余拉应力逐渐增大,并逐渐趋于屈服强度 σ_s 。在焊缝中部区域,数值约为材料的屈服强度 σ_s ,并基本保持不变。焊缝中心线上横向应力分布形状与纵向残余应力略有差异。在焊缝的起始端及终止端均表现为比较大的残余压应力,焊缝中部局部出现拉应力,但拉应力值比材料的屈服强度低很多。

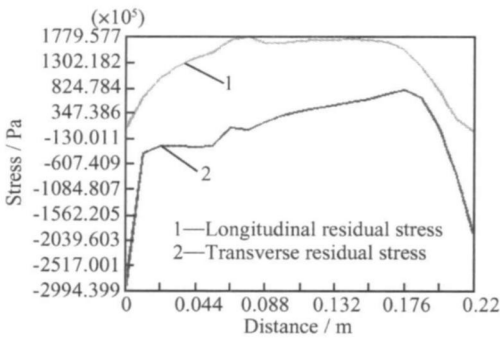


图 7 残余应力沿焊缝中心线分布

Fig. 7 Residual stress distribution along the weld centerline

沿垂直于焊缝方向残余应力的分布如图 8 所示。可见,焊缝及近缝区的纵向残余应力为拉应力,焊缝区以外纵向残余应力逐渐由拉应力变为压应力。横向残余应力在焊缝及近缝区则表现拉应力,拉应力大小随着远离焊接起始点而逐渐下降。

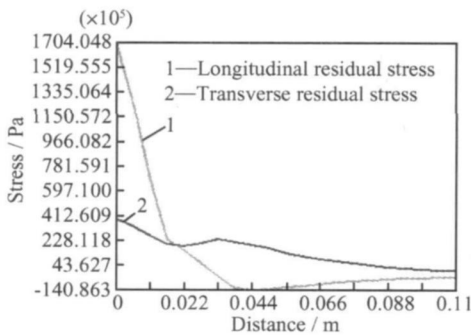


图 8 残余应力沿垂直焊缝方向分布

Fig. 8 Residual stress distribution along the vertical direction of weld

理论上,在焊接过程中,焊缝区以远高于周围区域的速度被急剧加热,焊缝区材料受热膨胀,热膨胀受到周围较冷区域的约束,并造成热应力,受热区域温度升高后屈服极限下降,热应力可部分超过该屈

服极限,这样焊缝区形成了塑性的热压缩。冷却后,焊缝区比周围区域相对缩短、变窄或减小,因此,这个区域就呈现残余拉应力,周围区域则承受残余压应力。图 5~图 8 应力变化规律和理论分析是一致的。

3.3 预拉伸对焊接残余应力的影响

由于纵向残余应力不均匀分布是引起焊接构件各种失稳、挠曲变形的最主要原因,所以本文重点研究了纵向残余应力 σ_x 的分布规律及特点。图 9 是对铝合金施加同样的焊接工艺参数,在无预加应力(曲线 a)、预加应力 σ_p 分别取 30% $\sigma_{0.2}$ (曲线 b)、60% $\sigma_{0.2}$ (曲线 c)、90% $\sigma_{0.2}$ (曲线 d)时的焊后纵向残余应力曲线。从图 9 可以看出,随着预加应力的增大,焊后纵向残余应力总体变化趋于平缓,残余应力的平均幅值得到有效控制。尤其是当预拉伸应力 $\sigma_p = 90\% \sigma_{0.2}$ 时,其应力值都被控制在较低的水平,曲线已趋于水平。当预拉伸应力 σ_p 从 0 增加到 90% $\sigma_{0.2}$ 时,在离焊缝中心线 10mm 处的纵向残余拉应力从最大时的 85MPa 减小到 9.5MPa 降低了 88.8%,纵向残余压应力最大值则从 19.5MPa 减小到 2.8MPa 降低了 85.6%。图 10 对比示出 $\sigma_p = 90\% \sigma_{0.2}$ 纵向残余应力模拟值与实测值的曲线,从图中可以看出,模拟结果和实测结果基本吻合。

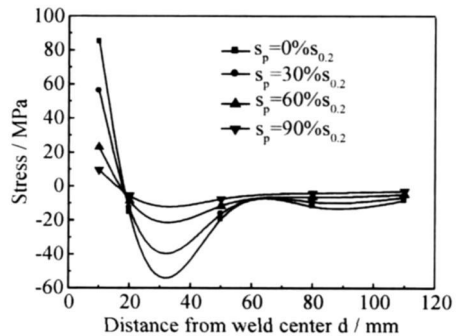


图 9 不同预应力下的纵向残余应力

Fig. 9 Longitudinal residual stresses under different pre-tension stresses

通过对焊接试板预制拉伸应力,可以改变焊接加热和冷却过程中应力应变的分布特征。在加热阶段,焊缝和近缝区的金属发生热膨胀,受到周围较冷金属的约束,从而在该区域产生压缩应力。由于预加拉应力的存在,部分地抵消了压缩应力,这样就减小了焊缝和近缝区金属的残余压缩塑性变形量。从而在冷却时,使得相应的收缩应力也随之降低,即降低了焊缝和近缝区的残余拉应力。预加应力焊接法不仅可以减小焊缝及近缝区加热过程中压应力的峰

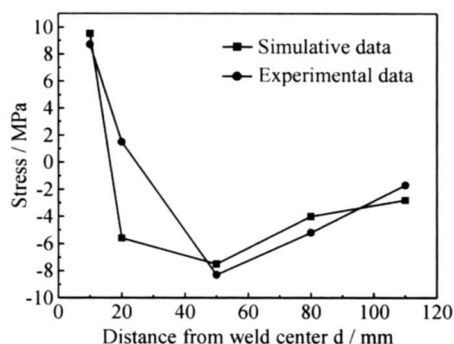


图 10 $\sigma_p = 90\% \sigma_{0.2}$ 纵向残余应力曲线图

Fig. 10 Longitudinal residual stresses after welding under $\sigma_p = 90\% \sigma_{0.2}$ as pre-tension stress

值,而且可以使压应力区变窄,甚至使原来的压应力区变为拉应力区,同时预制拉应力与收缩拉应力联合作用,还可以增大冷却过程中形成的塑性拉伸应变,从而进一步减小焊缝两侧的残余拉应力。

4 结 论

(1)在焊接过程数值模拟基本理论的基础上,运用 ANSYS 有限元分析软件,对铝合金平板对接焊过程参数化编程,进行了焊接温度场、应力场的模拟分析,模拟结果与理论基本一致。

(2)对不同预拉伸应力条件下铝合金板材纵向残余应力的模拟分析结果显示,预拉伸焊接法可以有效控制铝合金焊接残余应力。随着预拉伸应力增

大,其焊后残余应力值逐渐减小,试板横断面上纵向残余应力分布曲线越来越平缓。当预拉伸应力 σ_p 从 0 增加到 $90\% \sigma_{0.2}$ 时,纵向残余应力降低了 85.6%。

(3)预拉伸条件下试板纵向残余应力模拟值的大小和分布特征,与实验测定结果基本一致。

参考文献:

- [1] 田锡唐. 焊接结构 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997
- [2] 机械工程学会焊接学会. 焊接手册第三卷 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] 王者昌. 关于焊接残余应力消除原理的探讨 [J]. 焊接学报, 2000(6), 21(2): 55-58
- [4] PAVLOVSKY V I MASUBUCHIK. Residual stress and distortion in welded structures [J]. WRC Bulletin 388, 1994
- [5] LOBNOV L M. Heat abstracting paste reduces distortions [J]. Welding and Metal Fabrication, 1982(3): 65-70
- [6] 李敬勇, 章明明, 李鹰, 等. 预拉伸对铝合金焊接残余应力和变形的影响 [J]. 热加工工艺, 2005(12): 15-17.
- [7] 岳红梅, 赵海燕, 蔡志鹏, 等. 薄壁铝合金焊接应力变形数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 223-227.
- [8] 张文钺. 焊接传热学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [9] 陈楚. 数值分析在焊接中的应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.
- [10] 莫春立, 钱百年, 国旭明, 等. 焊接热源计算模式的研究进展 [J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 93-96

Numerical Simulation of Welding Distortions of Aluminum Alloy under Pretension Stresses

LI Jing-yong¹, LU Zhi-peng¹, WANG Hu¹, LU Ya-ming¹

(1. Advanced Welding Technology Provincial Key Laboratory, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China)

Abstract The temperature and stress fields which appeared during welding of aluminum alloy sheet under different pre-tension stresses are numerically simulated by using ANSYS finite element analysis software and programming with APDL language. The calculation results show that pre-tension welding method can reduce the welding residual stresses effectively, and the longitudinal and transverse residual stress decrease gradually with the pre-tension stress increasing. When pre-tension stress σ_p changes from 0 to $90\% \sigma_{0.2}$, the residual stress reduced by 85.6%. The simulated results are well consistent with the experimental ones.

Key words Aluminum alloy; pre-tension; residual stress; numerical simulation