

铝合金多层多道窄间隙 TIG 焊接头应力场研究

长 春 工 业 大 学 材 料 科 学 与 工 程 学 院(130012) 王立楠
范伟光
哈 尔 滨 工 业 大 学(威 海) 材 料 学 院 山 东 省 特 种 焊 接 技 术 重 点 试 验 室(264209) 舒凤远
赵洪运
青 岛 软 控 机 电 工 程 有 限 公 司(266100) 张成良

摘要 以厚板结构件的焊接及车体焊接的维修为背景,针对 7A52 铝合金的多层多道焊接力学计算进行研究,采用窄间隙 TIG 焊方法,通过试验设置合理的工艺参数,建立了厚板铝合金焊接数值模拟的有限元模型,探讨了焊接接头残余应力场的分布规律,并用小孔法对数值法计算的残余应力做了验证。结果表明,对于横向焊接残余应力,焊缝区中部为拉应力,两端为应力值较小的压应力;对于纵向焊接残余应力,以焊缝为中心形成拉应力区。窄间隙 TIG 焊接头背面焊缝横向与纵向应力均为拉应力。数值法计算的结果与小孔法实测结果无明显差异,计算结果准确可靠。

关键词: 铝合金 厚板 有限元 窄间隙焊接
中图分类号: TG442

0 序 言

如今的装备车辆随着军事、航天的需要,很大一部分关键性构件需要焊接成型。装备轻量化的要求使不同规格厚板铝合金成为结构材料的首选,提高维修效率并缩短维修保障的反应时间是信息化条件下装备维修的重要研究内容^[1]。电弧焊凭借机动性高、成本低和效率高的优势倍受应急维修的青睐^[2-3]。在焊接方面,窄间隙焊接已成为提高厚板焊接效率和缩短焊接时间的一种有效途径,焊接工艺决定了不同尺度装备零部件焊接接头的焊接质量,甚至影响整体的使用寿命。目前,对窄间隙焊接的定义尚不存在统一的量化标准,凡是使原来焊接坡口面积缩小的均称为窄间隙焊接,从坡口形貌上判断,当焊缝成形系数小于等于 1 时称为窄间隙焊接^[4]。由于厚板铝合金

焊缝需要大量的焊丝,显然单道焊远远无法满足厚板铝合金的焊接要求。在材料方面,Al-Zn-Mg 系铝合金是室温下强度最高的铝合金结构材料^[5],也是目前最重要的飞机结构材料,其中,7A52 铝合金已广泛应用于飞机结构件、装备车辆车体和高速列车结构件中^[6]。针对 7A52 铝合金在厚度为 20~40 mm 的焊接,研究了窄间隙 TIG 焊接坡口残余应力分布预测的关键问题。

1 试验材料及焊接参数设置

1.1 试验材料

7A52 铝合金化学成分见表 1。7A52 铝合金焊接用母材经过轧后固溶、预时效、双级时效等过程,不同的双级时效状态导致物相组成和分布形态的差异,对强度、硬度、抗腐蚀性能所造成的影响效果不同。

表 1 7A52 的化学成分(质量分数,%)

Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Ti	Zr	Fe	Si	Al
4.4	2.4	0.12	0.36	0.2	0.1	0.12	≤0.30	≤0.25	余量

7A52 合金的主要强化相包括过渡相(或亚稳相)及平衡相^[7]。

7A52 铝合金属于超硬铝合金,合金体系为 Al-Zn-Mg,虽然具有良好的焊接性能,但在高拘束度条件下焊接时会产生很大的应力,因而焊接用焊丝首先要考虑

焊接接头的裂纹敏感性。采用高强铝合金焊丝容易导致焊后裂纹产生,因此选用配套焊丝型号为 ER5356,其化学成分见表 2。

表 2 ER5356 焊丝的化学成分(质量分数,%)^[8]

Mg	Zn	Cu	Ti	Mn	Cr	Al
4.5 ~ 5.5	0.10	0.1	0.06 ~ 0.20	0.05 ~ 0.20	0.05 ~ 0.20	余量

1.2 厚板铝合金 TIG 焊焊前准备

焊接道次如图 1 所示。采用丙酮对焊接件表面去污处理,采用钢刷和三棱刀去除焊接板表面氧化膜,并在 40 ℃ 的烘干箱中进行表面干燥处理。采用变极性 TIG 焊方法进行焊接,利用阴极雾化作用去除电弧区的氧化膜,正负半波时间比为 1:1;焊接道次之间充分冷却,以保证层间温度低于 80 ~ 100 ℃;层间冷却后进行层间清理。

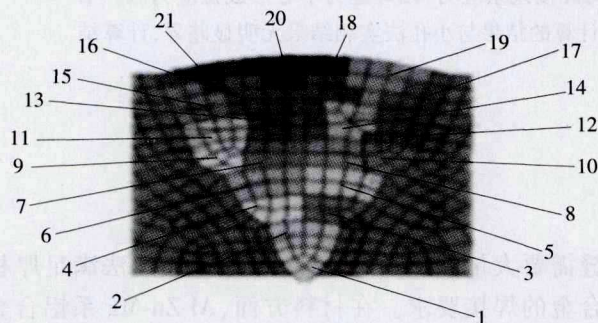


图 1 TIG 焊焊接道次示意图

1.3 焊接参数设置

TIG 焊焊接参数见表 3。焊接道次为 21 道,焊接工艺参数分为三类,第一道为打底参数,焊接过程中应严格控制焊接规范,第二类为填充参数,调节参数的目的是避免侧壁上的咬边、保证良好的润湿并获得一定

的熔深以满足焊接强度的要求,相对于打底焊焊接参数和盖面参数,可采用较大焊接参数。第三类为盖面参数,应采用小参数。

表 3 TIG 焊焊接参数

道次	类型	焊接电流 I/A	焊接速度 v/(m · min ⁻¹)
1	打底焊	260	0.15
2	填充焊	340	0.20
3 ~ 17	填充焊	340 ~ 360	0.20
18 ~ 21	盖面焊	230	0.14

2 热边界条件和机械边界条件的设置

材料热过程计算的边界条件包括电弧的热输入、热传导及相变过程和材料向空气的散热及材料向衬板的散热。文中研究的数值模拟边界条件包括热边界条件和机械边界条件。

2.1 热边界条件

热边界条件模型内部热传导和相变过程可表征于材料的热平衡方程中。根据热力学第一定律,材料内部的热传递过程可表征为热平衡方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho q_i \quad (1)$$

式中, $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$ 定义为导热系数; ρ, q_i 定义为相变潜热。

热边界条件中材料与环境之间的热交换方式包括对流、热传导和辐射三种混合传热方式,随着温度的不同,热交换方式的占比不同。导热过程可表征为:

$$Q_\lambda = \lambda_{at} (T_F - T_{at}) \quad (2)$$

式中, λ_{at}, T_F 和 T_{at} 分别为热导系数、焊件表面及环境的温度。

焊件表面对环境的热辐射过程可表征为:

$$\phi = A\sigma(T_F^4 - T_{at}^4) \quad (3)$$

式中, ϕ, A 和 σ 分别为辐射散热量、材料的发射率及 Stefan - Boltzmann 常数。

焊件表面向环境的对流散热属于自然对流散热,包括一个水平平板平面及两个竖直平面和环境的自然对流散热,对流换热量可表征为:

$$Q_C = C(G_r \cdot P_r)^n (T_F - T_{at}) \quad (4)$$

式中, $G_r \cdot P_r$ 为瑞利准则; C 与 n 是与壁面形状、位置及边界条件有关的常数。对于散热面朝上的水平板, $G_r \cdot P_r$, 常数 C 和指数 n 分别取值为 $1.6 \times 10^5, 0.54$ 和 0.25 ; 当水平板散热面向下时,则分别为 $1.0 \times 10^7, 0.7$ 和 0.3 。焊接过程中焊接母材下表面压紧于钢衬板上

表面,假设焊接母材与衬板之间的热交换过程为热传导,导热系数为钢衬板的热传导系数。

热边界还包括焊件与电弧之间的边界,该热边界条件通过焊接热源模型的设置实现。

2.2 机械边界条件

厚板 7A52 铝合金焊接维修条件下,要求严格限制焊接接头角变形,故机械边界条件为对称的刚性固定边界条件。机械边界条件通过自锁装置固定焊接板件的四个棱角实现,故模型中的机械边界条件为:焊接板件的四个棱角刚性固定,与衬板接触的背面沿 Z 轴负方向的位移量为 0,如图 2 所示。

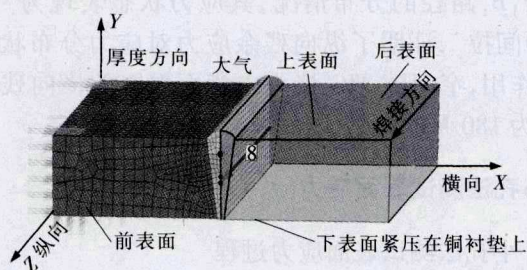


图2 机械边界条件设置示意图^[9]

2.3 有限元网格划分

为了提高计算结果的精度并节约计算时间,焊缝区及其附近采用更细化的网格规格,TIG焊有限元模型网格划分如图3所示。

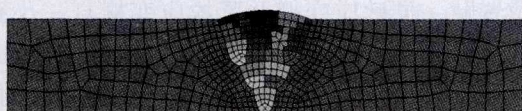


图3 TIG焊有限元模型的网格

3 TIG 焊接头残余应力

3.1 多道焊接接头残余应力场分布路径

研究模型为笛卡尔直角坐标系,其中横向应力为 X 方向,纵向应力为 Z 方向。残余应力研究对象的选取方法如图4所示,在焊缝中段取垂直于焊缝的横截面,在横截面上分别取焊缝中垂线和垂直于焊缝中垂线的两条路径 DT 和 CO ,焊缝的上表面和下表面分别取路径 F_1B_1 和 F_2B_2 。

3.2 TIG 焊接头纵向残余应力

纵向残余应力沿路径 DT , CO , F_1B_1 和 F_2B_2 的分布分别如图5~8所示。在焊缝的正面和背面,纵向残余应力在焊缝及其附近表现为拉应力,远离焊缝的区域为压应力区。在沿着焊缝的方向上,纵向应力分布

表现为在焊缝两端较小,中心部分为应力值稳定的拉应力区,而且拉应力最大值位于靠近两端的部位。纵向残余应力在沿厚度方向的焊缝对称线上的分布表现为两端拉应力、中间压应力;在 $1/2$ 厚度位置出现压应力的极大值,极大值为 130 MPa。材料内部从焊缝到母材的路径 CO 由压应力变为拉应力再到压应力,其应力差值最大约为 210 MPa。

3.3 TIG 焊接头横向残余应力

横向应力沿路径 DT 和 CO 的分布如图9~10所示。横向残余应力由背面焊缝到正面焊缝的分布表现为拉应力→压应力→拉应力。图11描述了横向应

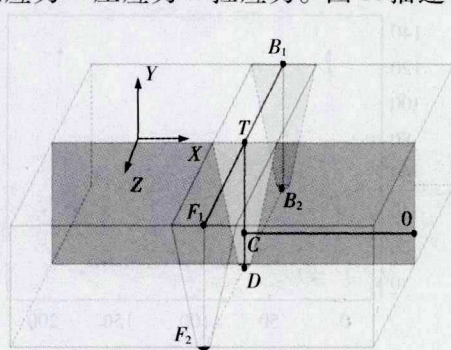


图4 有限元模型中应力提取路径示意图

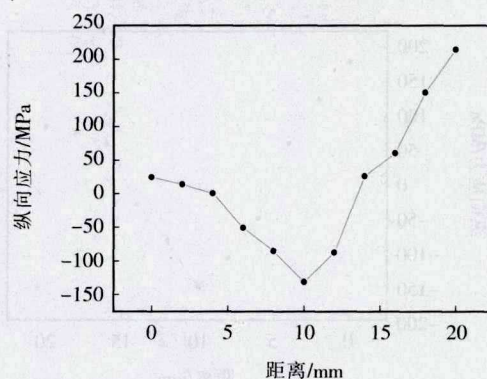


图5 沿路径 DT 分布的纵向残余应力

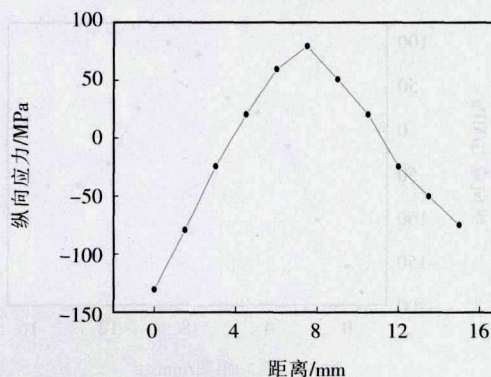


图6 沿路径 CO 分布的纵向残余应力

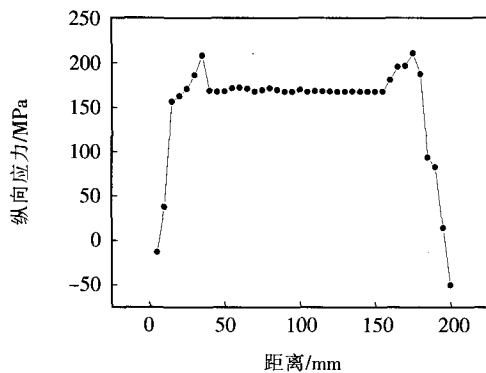


图7 沿路径 F_1B_1 分布的纵向残余应力

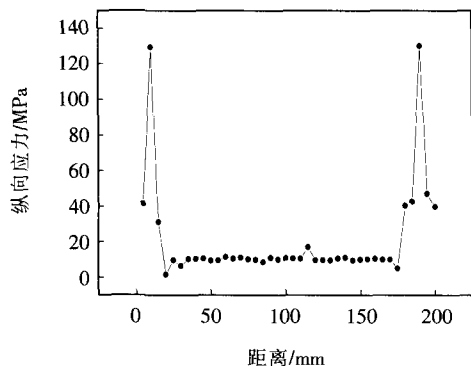


图8 沿路径 F_2B_2 分布的纵向残余应力

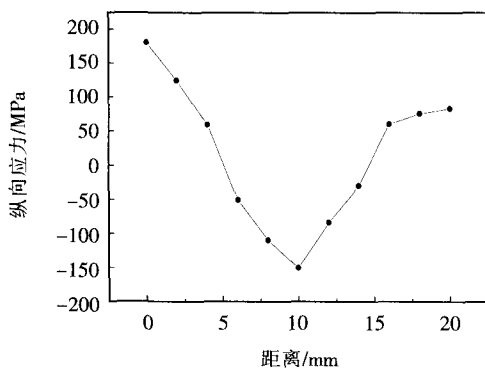


图9 沿路径 DT 分布的横向残余应力

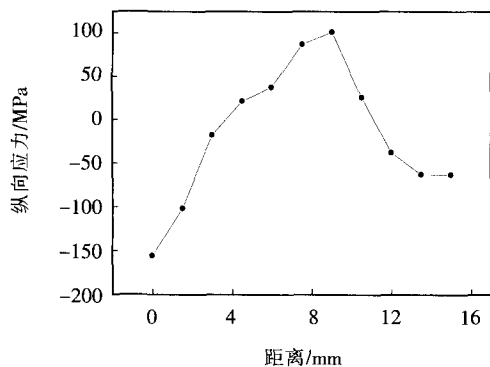


图10 沿路径 CO 分布的横向残余应力

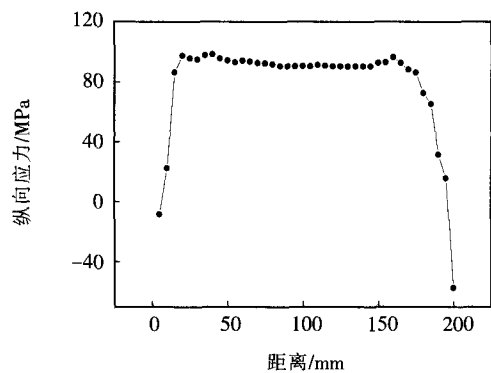


图11 沿路径 F_1B_1 分布的横向残余应力

力沿 F_1B_1 路径的分布情况,其应力状态表现为“两端压、中间拉”,证明了纵向残余应力对应力分布状态的支配作用,窄间隙 TIG 接头中背面焊缝的横向残余拉应力为 180 MPa。

4 小孔法测试表面应力

4.1 小孔法测试表面应力过程

采用小孔法测试表面残余应力,为了消除氧化膜对测量结果的影响,试验前采用 1 000# 水砂纸打磨焊件;为了消除打磨过程对表面应力分布的影响,将焊件置于 10% 的 NaCl 溶液氛围进行电解抛光,再测试材料的表面应力。

假定一块各向同性的平板中存在残余应力 σ_R ,在某一位置贴一灵敏应变栅并紧挨应变栅打一小孔,则孔边的应力充分释放而下降为零,应变栅中离孔边愈近的区域,产生的应变越大,释放的应力越高。对于表面残余应力,检测过程中需要求出的未知量包括两个主应力 σ_1 和 σ_2 和主应力方向角 θ ,如图 12 所示,因此需要三个应变栅组成应变花并根据应变测量结果列出方程组。

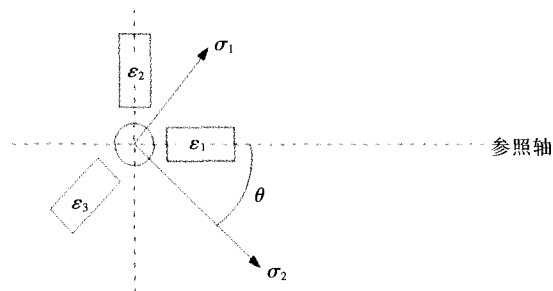


图12 小孔法测应力应变片和主应力示意图

根据胡克定律,在极坐标中, $\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_\theta)$,

最终应力公式为:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{2} \cdot \frac{1}{k_1} \cdot \left\{ \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \frac{\mu k_2}{k_1}} - \frac{1}{1 + \frac{\mu k_2}{k_1}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \right\} \\ \sigma_2 = \frac{E}{2} \cdot \frac{1}{k_1} \cdot \left\{ \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \frac{\mu k_2}{k_1}} + \frac{1}{1 + \frac{\mu k_2}{k_1}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \right\} \\ \tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \end{cases} \quad (5)$$

式中, E 为弹性模量; k_1 和 k_2 为释放常数, 与孔径与应变片有关; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别为应变片 $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ 测得的应变值; σ_1, σ_2 为互相垂直的两个主应力; θ 为主应力方向角。

使用设备为 YC-IV 型应力测量仪, 该测量仪是盲孔法测残余应力的专用仪器, 分辨率为 $1 \mu\varepsilon$, 基本误差不高于 $\pm 0.15\%$ 。

采用小孔法沿路径 F_2B_2 测试获得的接头背面纵向焊接残余应力平均值为 10 MPa , 相应位置数值模拟应力平均值为 18 MPa , 二者对比如图 13 所示。

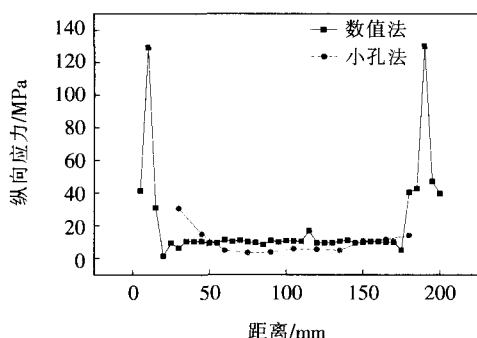


图 13 数值法与小孔法测得的应力值比较

4.2 数值法和小孔法的残余应力结果差异分析

TIG 焊背面的纵向残余应力的计算值明显高于小孔法测量结果。焊接残余应力产生于材料内部塑性变形的不均匀性, 数值方法的边界条件中将拘束定义为刚性夹固, 而实际焊接过程中不存在理想条件下的刚性固定, 即总是存在一定程度的变形而使焊接应力得到一定程度的释放。此外, 虽然小孔采用喷砂的方法加工获得, 且加工过程严格遵守试验规定, 但试验中应变片的灵敏性和测量工件表面的平整度等因素对残余应力的检测结果均有影响。

5 结 论

(1) 对于横向焊接应力: 焊缝区的中部为拉应力, 两端为应力值较小的压应力; 对于纵向焊接应力: 以焊缝为中心形成拉应力区。

(2) 窄间隙 TIG 焊接头背面焊缝的横向与纵向应力均匀拉应力。

(3) 在焊缝中心厚度方向上中间出现压应力极大值为 130 MPa ; 材料内部焊缝到母材路径上, 由压应力变为拉应力再到压应力, 其应力差值最大约为 210 MPa 。

(4) 数值法计算的结果与小孔法实测结果无明显差异, 计算结果准确可靠。

参 考 文 献

- [1] 徐滨士, 马世宁, 朱 胜, 等. 信息化条件下武器装备的应急维修与再制造[M]. 徐滨士院士教学、科研文选. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [2] 陈芳雷, 李 艳. 电弧焊焊接材料的发展现状及趋势[J]. 太原科技大学学报, 2005, 26(2): 140-146.
- [3] Lequeu P, Smith K P, Daniélou A. Aluminum-copper-lithium alloy 2050 developed for medium to thick plate[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2010, 19(6): 841-847.
- [4] 姜焕中. 电弧焊及电渣焊[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [5] Nie X W, Zhang L J, Du Y. Experiments and modeling of double-peak precipitation hardening and strengthening mechanisms in Al-Zn-Mg alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 2138-2144.
- [6] 黄兰萍, 陈康华, 李 松, 等. 高温预析出对 Al-Zn-Mg 铝合金组织、力学性能和应力腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005(5): 727-733.
- [7] 刘存龙, 吕耀辉, 向永华, 等. 变极性等离子弧铝合金熔覆层组织和性能[J]. 中国表面工程, 2009, 22(2): 37-40.
- [8] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] Shu F Y, Lü Y H, Liu Y X, et al. Residual stress modeling of narrow gap welded joint of aluminum alloy by cold metal transferring procedure[J]. Construction & Building Materials, 2014, 54: 224-235.

作者简介: 王立楠, 1990 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为铝合金焊接应力场。