

7075 铝合金电动自行车车架 GTAW 焊接过程温度场的三维有限元分析及工艺优化

易传佩

(湖南机电职业技术学院, 湖南 长沙 410151)

摘要:采用焊接专用有限元分析软件对 7075 高强铝合金电动自行车车架 GTAW 焊接过程进行数值仿真, 分析不同热输入条件下的温度场分布和熔池形态, 探索其最优热源参数。结果表明: 在最优热源参数下, 达到准稳态时的熔池长度为 10 mm, 熔宽为 6 mm, 熔池最高温度不超过 1100 °C。此外, 分析了最优热源参数下的焊接热循环特性。研究结果可为下一步预测焊接变形和残余应力的分布提供热学方面的理论借鉴。

关键词:7075 铝合金; 钨极氩弧焊; 温度场分布; 有限元分析

中图分类号:TG404

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2013)15-0180-03

3-D Finite Element Analysis of Temperature Field and Process Optimization in GTAW Welded 7075 Aluminum Alloy Electric Bicycle Frame

YI Chuanpei

(Hunan Mechanical & Electrical Polytechnic, Changsha 410151, China)

Abstract: The welding process of GTAW welded 7075 high strength aluminum alloy electric bicycle frame was numerical simulated by special welding finite element analysis software. The temperature distribution and morphology of molten pool under different heat input conditions were analyzed, and the optimal heat source parameters was explored. The results show that: the length of molten pool at quasi-steady under optimum heat source parameters, the corresponding weld width is 6mm, and the maximum temperature of molten pool can exceed 1100 °C. In addition, the heat cycle characteristics under optimum heat source parameters were analyzed. The results can provide thermal theory help for further prediction of welding deformation and residual stress distribution.

Key words: 7075 aluminum alloy; GTAW; temperature distribution; finite element analysis

作为一种轻便实用的代步工具, 电动自行车凭借其省力、操作简单、环保和无污染等优点, 深受广大消费者喜爱。目前, 电动自行车车架主要以铝合金为主, 通常由几部分铆接或焊接而成。由于铝和氧具有很强的结合能力, 焊接中容易产生 Al_2O_3 。 Al_2O_3 的熔点高达 2050 °C, 远远超过铝及铝合金的熔点(660 °C)^[1]。焊接过程中, Al_2O_3 薄膜会阻碍熔化金属之间良好结合, 形成夹渣, 并且还会吸附水分, 在焊缝中产生气孔, 降低接头强度。焊接过程的热输入及熔池在高温的停留时间是决定焊缝接头 Al_2O_3 形成量的主要因素^[2]。因此, 研究铝合金电动自行车车架 GTAW 焊接过程的热特性, 对于确定最优热源参数, 进而抑制焊接接头 Al_2O_3 的形成具有十

分重要的意义。

本研究基于焊接专用有限元分析软件, 研究某电动自行车企业 7075 铝合金车架前管和连接管 GTAW 焊接过程的热特性, 并确定最优热源参数, 以期为进一步预测焊件的残余应力和变形奠定热学基础。

1 材料性能参数

电动自行车车架材料为 7075 高强铝合金, 室温下其 $R_m=524$ MPa, $R_{p0.2}=455$ MPa, $A=11\%$, 弹性模量 71 GPa, 硬度 150 HB。数值计算时, 设定其合金成分(质量分数, %) 值为: 0.4Si, 0.5Fe, 1.6Cu, 0.3Mn, 2.5Mg, 0.23Cr, 5.6Zn, 88.87Al; 用到的依赖于温度变化的 7075 铝合金热物理性能参数(导热率、比热容、密度)由材料组织性能计算软件 Jmatpro 数据库获取。

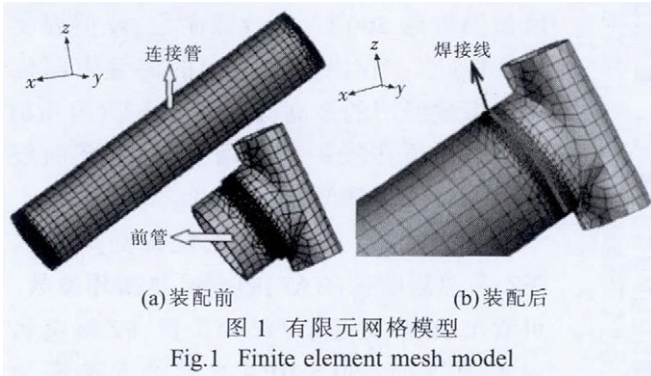
2 有限元分析

焊接结构包括电动自行车车架前管和连接管

收稿日期:2013-03-12

作者简介:易传佩(1962-),男,湖南洪江人,高级讲师,国际焊接工程师,研究方向:焊接工艺、机械设计、高职教育;电话:18974926623;
E-mail:2511813112@qq.com

(图 1(a)), 两者装配后网格模型如图 1(b)所示。进行网格划分时, 为保证计算的准确性, 并考虑计算时间的合理性, 焊缝区域网格划分致密, 远离焊缝区域网格划分稀疏, 网格单元类型主要为 8 节点六面体和 6 节点五面体单元。



选用 3-D 双椭球热源模型 (Goldak 热源模型)^[3]进行热学计算, 热流密度在前后半球区域内的分布描述为:

$$q_f(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}(f_f Q)}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2}-\frac{3y^2}{b^2}-\frac{3z^2}{c^2}\right), x \geq 0 \quad (1)$$

$$q_r(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}(f_r Q)}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2}-\frac{3y^2}{b^2}-\frac{3z^2}{c^2}\right), x < 0 \quad (2)$$

式中: Q 为热输入功率, $Q=\eta UI$, 本文取 $\eta=0.7$; a_f 、 a_r 、 b 、 c 分别为热源模型高斯参数; f_f 、 f_r 为前、后半椭球体内热输入的份额, 且 $f_f+f_r=2$, 本文 f_f 、 f_r 的取值分别为 1.2 和 0.8。

热源在对模型加热过程中的热传导是一个非线性的过程, 此过程的瞬态非线性传热分析方程可表述为^[4]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_l (t \geq 0) \quad (3)$$

式中: T 为材料的瞬时温度 ($^{\circ}\text{C}$); λ 为材料的热导率 ($\text{W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); q_l 为热源单位时间产生的热量 ($\text{W} \cdot \text{min}^{-1}$); ρ 为材料密度 ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$); c 为材料的比热容 ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

模型与周围空气之间通过对流热交换散失的热量(q_a)符合 Newton 冷却方程, 可描述为:

$$q_a = -h_a(T_s - T_a) \quad (4)$$

式中: q_a 为工件与空气之间的热交换能量; h_a 为对流热交换系数; T_s 为工件表面温度; T_a 为周围空气的温度, 取为 20°C 。假设 h_a 是不随温度变化的定值^[5], 取

值为 $10 \times 10^{-6} \text{W}/(\text{mm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$ 。

模型与周围空气之间通过热辐射散失的热量(q_r)遵循 Stefan-Boltzman 定理, 可描述为:

$$q_r = -\varepsilon \sigma [(T_s + 273.15)^4 - (T_a + 273.15)^4] \quad (5)$$

式中: ε 为辐射系数, 取值为 0.8^[6]; σ 为 Stefan-Boltzman 常量, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{mm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^4)$ 。

连接管壁厚为 6 mm, 预设 6 组热流密度值进行热源调试, 根据准稳态时的熔池形貌, 判断最优的热源参数。热源调试的原则是: 依据《焊接手册》第 12 章铝合金材料焊接的相关工程经验, 以及本研究中 7075 铝合金电动自行车车架待焊部位壁厚, 预设焊缝熔深、熔宽取值范围为熔深 4~6 mm, 熔宽 6~8 mm, 在焊缝熔深、熔宽预设值范围内进行最大热流密度调试。调试用热源参数如表 1。

表 1 热源模型参数

Tab.1 Parameters of heat source model

	$Q_f/(\text{W} \cdot \text{mm}^{-3})$	$Q_r/(\text{W} \cdot \text{mm}^{-3})$	a_f/mm	a_r/mm	b/mm	c/mm
参数 1	36	24	2	4	2	2
参数 2	36	24	3	5	2	2
参数 3	48	36	3	5	2	2
参数 4	60	48	3	5	2	2
参数 5	36	24	3	5	3	3
参数 6	48	36	3	5	3	3

3 计算结果分析

3.1 最优热源参数的确定

图 2 给出了对应 6 组热源参数的熔池形貌及温度场分布调试结果。图 2(a)、(b)显示, 参数 1 和参数 2 条件下, 待焊部位的热源中心温度均未达到 7075 铝合金的熔点(660°C)。在参数 2 预设熔池尺寸基础上, 增加焊接热输入(即参数 3 和 4)进行计算, 图 2(c)、(d)为对应参数 3 和 4 的计算结果。可看出, 在参数 3 条件下, 焊缝最高温度达到材料熔点, 但熔池较小、熔深不足。图 2(d)显示, 在该组参数下熔池进入准稳态后, 最高温度高于 965°C , 熔池尺寸同预设焊缝尺寸吻合良好。在参数 4 的基础上, 增大熔池预设尺寸, 降低熔池前后半椭球最大热流密度值, 得到参数 5 和 6, 并进行计算, 温度场的计算结果见图 2(e)、(f)。可看出, 在参数 5 条件下, 熔池最高温度区间合适, 但熔深、熔宽偏大; 而在参数 6 条件下, 熔池最高温度和熔池尺寸偏大较多, 熔深太大, 意味着实际焊接过程中, 待焊部位金属将被熔穿。综上分析, 选取参数 4 为最优热源参数。

3.2 最优参数下熔池 3D 形态

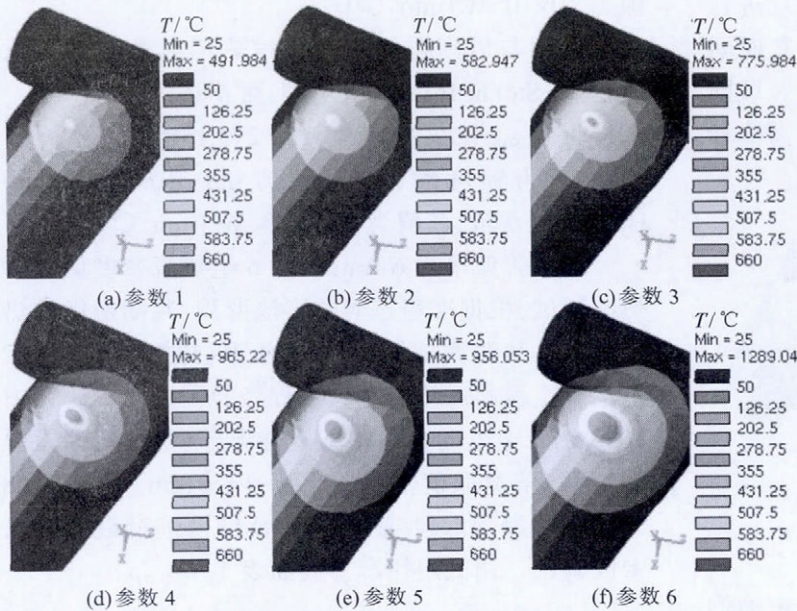


图2 不同热源参数下的熔池形态及温度场分布

Fig.2 The molten pool morphology and temperature distribution of samples under different process parameters

图3为从不同角度展示的最优热源参数(参数4)下熔池进入准稳态时的3D形貌。图3(a)显示,最优热源参数下,焊缝半熔宽为3 mm,满足预设熔宽范围4~6 mm。图3(b)显示,在连接管焊缝纵截面,熔池上部长10 mm、下部7 mm,这表明在最优热源参数下,连接管壁将被熔透。结合图3(c)、(d)所示前管焊缝部位熔池形貌,可以确定,在预设的最优热源参数下,能够实现7075铝合金车架连接管和前管良好冶金结合的同时,不会焊穿前管壁(图3(d))。

3.3 最优参数下焊接热循环

焊接热循环对焊缝组织

和性能有很大的影响,分析焊接热循环主要考虑以下几个参数:相变温度区间的冷却速度 ω_H (最高温度至415 °C)、焊缝和热影响区达到的最高温度 T_{max} 、相变以上温度(>415 °C)的停留时间 t_H 。

图4给出了最优热源参数下,焊接开始/结束位置及沿焊接方向焊缝中部位置距离焊接线不同距

离的4个取样点焊接热循环曲线(图中箭头表示给位置热源移动方向)。可看出,在焊接开始/结束位置,由于受起弧和收弧两次热输入的影响,该位置热循环曲线显示出两个温度峰值(图4(a)),在起弧阶段,峰值温度约500 °C,在收弧阶段,峰值温度约1035 °C;在沿焊接方向的焊缝中部位置,熔池经历的最高温度约821 °C(图4(b)),随距离焊接线距离的增大,热循环曲线峰值温度依次降低。

表2为对应图4样点位置的熔合区(FZ)和热影响区(HAZ)的焊接热循环参数。可看出,在焊接起始/结束位置,FZ区金属温度范围为660~1054 °C,冷却速率为391.3 °C/s, t_H 为1.51 s;HAZ区金属温度范围为415~539 °C,冷却速率为187.9 °C/s,

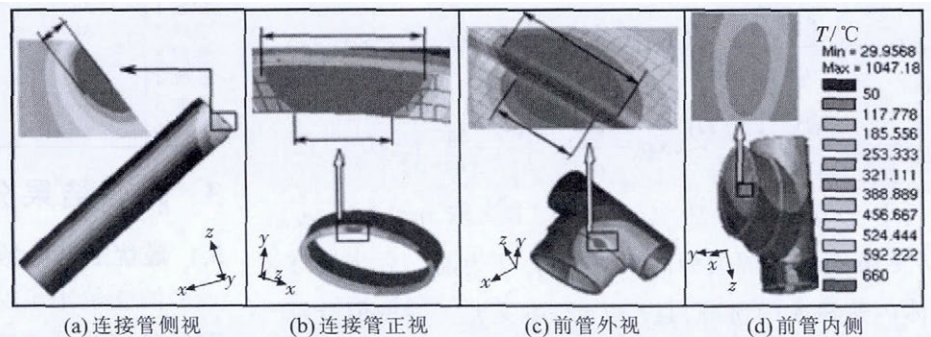


图3 最优热源参数下的熔池形态

Fig.3 Morphology of molten pool under optimal heat source parameters

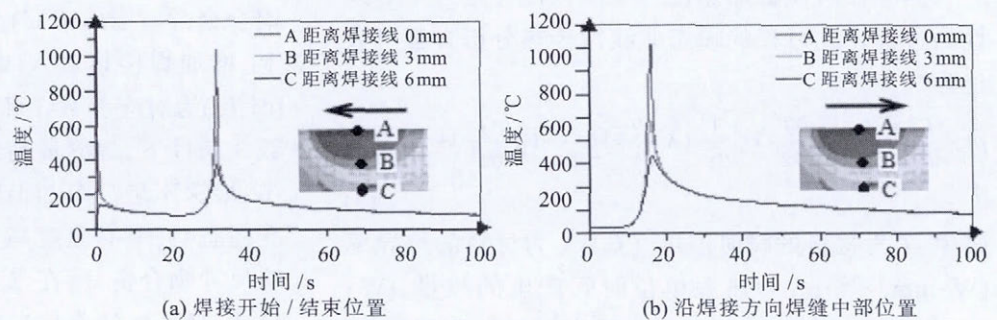


图4 不同位置的热循环曲线

Fig.4 Thermal cycle curves of different position

表2 不同位置的焊接热循环参数

Tab.2 Thermal cycle parameters at different position

	区域	$\omega_H/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	t_H/s
FZ	焊接开始/结束位置	391.3	1035	1.51
	沿焊接方向焊缝中部位置	345.1	821	1.32
HAZ	焊接开始/结束位置	187.9	539	0.66
	沿焊接方向焊缝中部位置	124.4	490	0.6

(下转第186页)

低磁钢或奥氏体不锈钢),拆除时不允许用锤击方法取下,只能用气割割短后再用风铲或碳弧气刨铲平,不允许损伤基体金属表面,并须用砂轮磨光,若在基体金属上有超过 0.5mm 深的咬口时,应清除缺陷,预热后补焊,并用砂轮磨平。

③临时用的固定板,如装配马、压排和起重吊马等的焊缝,离开接缝边缘应大于 30mm 以上。

④室温在 5℃ 以下时,应采取相应的措施,保证焊缝预热温度和层间温度不低于 80℃,不得水冷,焊后采取缓冷措施;预热温度的测量可用热电偶或测温仪;对拘束度大的重要接头,环境温度为 0℃ 以上时,可不预热,但焊前应除去坡口及两侧水分。

⑤焊接过程的控制:规定了定位焊时所用焊条、定位焊长度、焊前检查方法、返修措施;长焊缝的焊接方法和顺序;打底焊、多层多道焊和盖面焊的要求;多层多道焊时的道间温度、预热方法、焊接环境不符合时的控制。

⑥焊接完毕,检查焊缝外观质量;外观合格后进行内部探伤检查;焊后 24h 对焊缝进行内部探伤检查,结构刚度大的可选择在 48h 后进行,记录检测结果;焊缝检查不合格,应予修补,返修工艺与焊接工艺相同,同一部位返修次数不得多于 3 次。

⑦工艺上采取刚性固定法、反变形法、合理的装

配焊接顺序及焊接方向,预防焊接变形。

⑧零部件组焊后采用机械校正法;大型部件采用水火校正,加热温度不高于 950℃,重复加热不得超过 3 次,热弯加工的温度不大于 1200℃。

(6) 安全要求:在密闭和狭小舱室内焊接和碳弧气刨时,应安装通风设备,保证舱室通风良好,舱室入口有专人看护和协助工作;多名焊工相近同时作业时,应设有挡光板和专门防护罩,防止飞溅烫伤和弧光损伤焊工;焊工照明应用 36V 低压安全灯,焊接电源及照明等设备接地良好。

5 结束语

917 低磁钢因价格原因在民用项目上少有应用,但相对价格昂贵的不锈钢来讲,利用 917 钢的低磁性实现产品的特殊用途,在军用项目上有不错的应用范围。在结合生产厂家工程施工经验的基础上,通过试焊不断总结经验,最终完成了 917 钢工厂施工的工艺评定,并制定了相应的工艺规程。该工艺规程已在多项低磁产品的制造过程中得以应用,制造过程中,对接焊缝共拍片近 1100 张,Ⅱ级以上一次性合格率达 98.6%,返修片均一次返修合格。最早产品已于 2008 年投入使用,至今应用情况良好。 □

(上接第 182 页) t_H 为 0.66s。在焊缝中部位置,FZ 区金属温度范围为 660~835℃,冷却速率为 345.1℃/s, t_H 为 1.32s;HAZ 温度范围为 415~490℃,冷却速率为 124.4℃/s, t_H 为 0.6s。

4 结论

(1) 基于 7075 铝合金电动自行车车架前管和连接管的实际尺寸,采用 GTAW 方法进行焊接,达到准稳态时,熔池长度为 10mm,熔宽为 6mm,熔池最高温度不超过 1100℃。

(2) 最优热源参数条件下的焊接,在焊接起始/结束位置,熔合区金属温度范围为 660~1054℃,冷却速率为 391.3℃/s, t_H 为 1.51s;热影响区金属温度范围为 415~539℃,冷却速率为 187.9℃/s, t_H 为 0.66s。

(3) 在沿焊接方向的中部位置,熔合区金属温度范围为 660~835℃,冷却速率为 345.1℃/s, t_H 为 1.32s;热影响区温度范围为 415~490℃,冷却速率

为 124.4℃/s, t_H 为 0.6s。

参考文献:

- [1] 张传臣,陈芙蓉,高云喜. 高强铝合金 7A52 焊缝中焊接缺陷的产生及控制[J]. 热加工工艺,2007,36(11):18-20.
- [2] 刘志平,胡文浩,王广英,等. 铝合金车体底架边梁焊接缺陷研究与控制[J]. 热加工工艺,2011,40(13):144-146.
- [3] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metal. Tran. B, 1984,15: 299-305.
- [4] 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.
- [5] Deng D A. Study of welding inherent deformations in thin plates based on finite element analysis using interactive substructure method [J]. Mater. Des., 2009, 30: 359-366.
- [6] Kermanpur A,Shamianian M,Yeganeh V. Three-dimensional thermal simulation and experimental investigation of GTAW circumferentially butt-welded Incoloy 800 pipes [J]. J. Mater. Proc. Tech., 2008,199:295-303. □