

薄壁铝合金箱体焊接工艺优化实践

阎士标¹, 郑娜卿¹, 辛建社¹, 胡文喜², 孟庆子¹, 孙志浩¹

1. 河北太行机械工业有限公司 河北石家庄 056125

2. 中国人民解放军31664部队 青海格尔木 816000

摘要: 针对铝合金箱体在焊接成形过程中出现的变形问题, 进行了原因分析, 提出了解决措施, 采取应用焊接专用夹具、调整零件焊接顺序、优化焊接参数的方法, 进行了焊接工艺优化, 有效降低了焊接过程中箱体的变形量, 生产出了满足变形量要求的产品。通过对该箱体变形量问题的解决, 积累了超长薄壁铝合金箱体类零件的焊接经验, 对今后类似零件的焊接加工具有借鉴作用。

关键词: 铝合金; 薄壁; 焊接变形

Optimization of welding process for thin-walled aluminum alloy box

YAN Shibiao¹, ZHENG Naqing¹, XIN Jianshe¹, HU Wenxi², MENG Qingzi¹, SUN Zhihao¹

1. Hebei Taihang Machinery Industry Co., Ltd., Shijiazhuang 056125, Hebei, China

2. People's Liberation Army 31664, Golmud 816000, Qinghai, China

Abstract: In view of the deformation problem of aluminum alloy box body during welding forming process, this paper analyzes the causes and puts forward some solving measures, the welding process was optimized by using special welding fixture, adjusting welding sequence and optimizing welding parameters, which effectively reduced the deformation of the box during welding, the product can meet the requirement of deformation. By solving the problem of the deformation of the box, the welding experience of the super-long thin-wall aluminum alloy box parts is accumulated, which can be used for reference in the welding process of similar parts in the future.

Keywords: aluminum alloy; thin wall; welding deformation

1 序言

轻量化设计是目前特殊装备提高性能的重要措施之一, 由于铝合金材料具有比强度高、比刚度高及综合使用性能好的特性, 因此被广泛应用于装备的生产制造中。其中, 铝合金焊接是装备生产过程中采取的重要加工手段之一。在铝合金焊接过程中, 由于铝合金的比热容和溶解热比其他金属高, 且导热系数是钢的5倍^[1], 因此铝合金在焊接时需要

迅速吸收较多的热量才能达到焊接所需的温度^[2]。

同时, 由于铝合金的热膨胀系数较大, 铝合金焊接温度场在时间和区域上梯度差异性较大, 所以导致铝合金在焊接过程中变形量很大, 尤其对于超长薄壁铝合金箱体类零件, 变形量更大。由于零件的变形, 给零件的后续加工带来了很大的影响, 严重时会造成零件的报废, 因此在铝合金焊接过程中, 要在实践的基础上进行焊接工艺优化, 采取一定的措

第一作者: 阎士标, 正高级工程师, 主要从事产品开发工作, E-mail: ysb197@163.com。

施控制其变形量，以保证满足零件的要求。

2 某铝合金箱体结构及技术要求

某铝合金箱体三维实物如图1所示，箱体截面如图2所示，箱体轴向结构如图3所示。

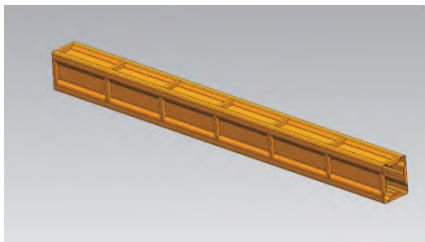


图1 铝合金箱体三维实物

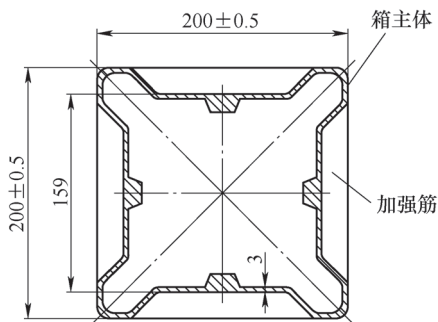


图2 箱体截面

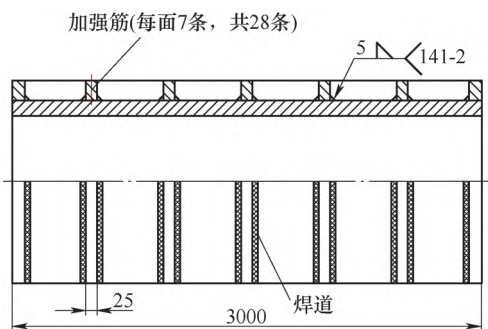


图3 箱体轴向结构

箱体由箱本体和加强筋组成，材料均为6A02铝合金。箱本体长度为3000mm、宽度为200mm、高度为200mm、壁厚为3mm。箱本体4个面共设置有28条宽度为25mm的加强筋，每面设置7条。箱本体和加强筋采用焊接方法连接在一起，箱体变形量要求为各面整体变形量 $\leq 3.5\text{mm}$ 。

3 箱体结构分析及加工方案的确定

由图1~图3可知，箱体为典型的超长薄壁筒形结构，箱本体截面形状特殊，长度超长，采用普通工艺加工难度很大，综合考虑，箱体加工方案如下。

1) 箱本体采用挤压成形的方法加工而成，材料为6A02铝合金。

2) 加强筋用铣加工的方法加工而成，材料为6A02铝合金。

3) 用焊接方法将箱本体和加强筋焊接在一起。

4 初步焊接参数的确定

通过对箱体加工方案分析可知，箱体在加工过程中的变形量由两部分组成，一部分为箱本体挤压成形过程中的变形量，另一部分为箱本体和加强筋焊接过程中产生的变形量。根据经验可知，箱本体在挤压成形过程中会产生较大的变形，经过人工校正处理后，箱本体最大变形量能控制在1mm之内。

根据箱体整体变形量 $\leq 3.5\text{mm}$ 的要求可知，除去箱本体挤压成形产生的1mm变形量，箱本体在焊接过程中，变形量不能超过2.5mm。根据此情况，工艺人员初步制定了焊接加强筋的工艺方案，具体工艺如下。

1) 用氩弧焊方法进行焊接。

2) 焊接设备采用米勒高性能TIG钨极氩弧焊机。

3) 焊接材料选用ER4043焊丝。

4) 焊接环境：环境温度 $\geq 16^\circ\text{C}$ ，空气相对湿度 $\leq 65\%$ 。

5) 焊接参数：每条加强筋对称焊2条焊道，每条焊道长130mm，焊缝高度5mm；焊丝直径3mm；钨极直径3mm；焊接电流180A；喷嘴直径12mm；保护气体流量14L/min。

6) 加强筋焊接顺序如图4、图5所示。

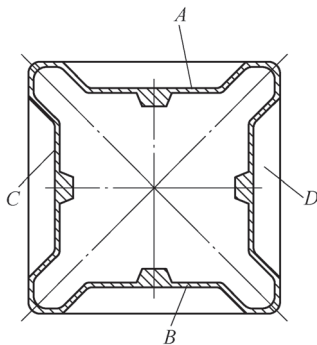


图4 箱体加强筋焊接顺序图1

注：A~D代表箱体4个表面。

焊接时，按A面、B面、C面、D面的焊接顺序，先焊每个面序号1加强筋，接着焊序号2~序号7加强筋。焊接前，先用砂纸对箱本体焊接部位两侧

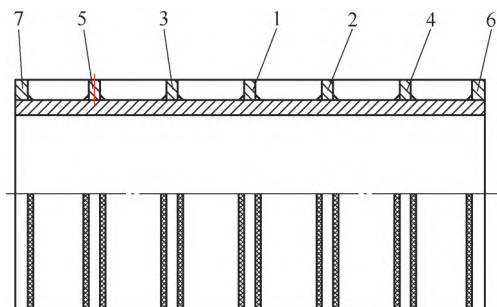


图5 箱体加强盘焊接顺序图2

注：1~7为加强筋代号。

50mm范围进行打磨清理，清除焊接部位的油污及氧化膜，用碱洗的方法对加强筋表面的污物及表面氧化膜进行清除。

5 箱体首次焊接效果

按照制定的焊接工艺方案，操作人员对箱本体和加强筋进行了首次焊接，焊接数量3件。焊接完成后，检验人员对箱体4个面变形量进行了检测（见图6），检测结果见表1。



图6 箱体焊接变形量检测

表1 箱体首次焊接变形量检测结果 (mm)

编号	箱体整体变形量要求	箱体4个面实测结果
1	≤3.5	4.6、5.0、4.4、3.8
2		5.8、4.6、4.4、4.8
3		5.4、5.2、4.4、4.2

根据表1检测结果可知，箱体实际变形量不满足要求。

6 箱体焊接变形原因分析

检测后，工艺人员对箱体焊接变形原因进行了分析，得出箱体焊接变形原因如下。

1) 箱本体结构特殊，超长薄壁，而且材料为铝合金，在焊接过程中，由于铝的热导率较高，线膨胀系数较大，焊接时局部受热，使得焊缝及其附近的区域膨胀程度不同^[3]，因此产生了不同程度的收缩和内应力，致使箱本体产生变形。

2) 焊接的加强筋数量较多，焊缝总长度达7m，焊缝长度较长，焊接时箱本体承受高热量较多，受热时间较长，导致箱本体产生较大的变形。

3) 焊接参数设置时，焊接电流较大，产生的焊接热量较大，容易导致箱本体产生变形。

4) 加强筋焊接顺序设计不合理，焊接时，产生的热量过于集中^[4]，导致箱本体焊接应力集中，从而产生变形。

7 箱体焊接工艺的优化

通过对箱体焊接变形原因的分析，技术人员对焊接工艺进行了优化改进。

1) 由于箱本体形状结构和材料已确定，不能更改，因此工艺人员设计了焊接专用夹具，以减小箱本体焊接变形。焊接专用夹具结构如图7所示。

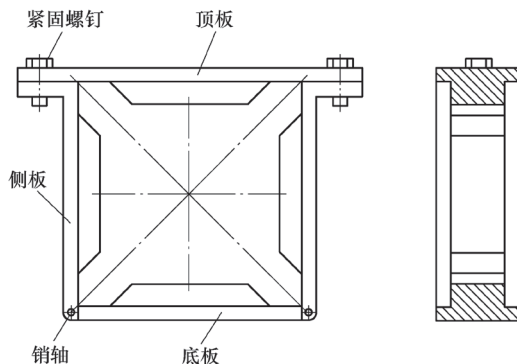


图7 箱体焊接专用夹具结构

由图7可知，焊接专用夹具由1个底板、2个侧板、1个顶板、2个销轴和2个紧固螺钉组成。箱体焊接时，共使用3套焊接专用夹具，分别安装在箱本体前部、中部和后部。安装专用夹具时，将紧固螺钉和顶板拆下，将箱本体放入焊接专用夹具中，使箱本体外表面和2个侧板紧密接触，然后装上顶板，并用紧固螺钉固定。这样在焊接加强筋时，焊接专用夹具可防止并减小箱本体的变形。所有的加强筋焊接完成后，将箱体和工装一起进行去应力处理，去应力完成后，再将焊接专用夹具拆下。

2) 减少焊缝长度，将每条焊缝长度由130mm减小为70mm，焊缝总长度由7m减少到3m，以减小焊接时间，减少箱本体焊接时接受的热量，从而减少变形量。

3) 将焊接电流从180A降低到140A，以减小焊接产生的热量。

4) 调整加强筋的焊接顺序，采取错位焊接方

法，即不同的面焊接不同序号的加强筋。焊接时，先焊A面序号1，再焊B面的序号6、序号7，再焊C面的序号2、序号3，再焊D面的序号4、序号5，以此类推，分散焊接所有的加强筋。错位焊接目的是分散、均衡箱体焊接时吸收的热量，减小箱体相同部位过多的热量，抑制、减小箱本体的变形。

8 工艺优化改进后的箱体焊接效果

按优化改进后的焊接工艺方案和方法，重新焊接3件箱体，焊接完成后，检验人员对箱体4个面变形量进行了检测，结果见表2。由表2可知，箱体变形量有了明显的减小，说明改进措施可行，效果明显。

表2 箱体焊接工艺改进后变形量检测结果 (mm)		
编号	箱体整体变形量要求	箱体4个面实测结果
1	≤3.5	3.2、2.8、3.4、3.2
2		3.4、3.2、3.0、3.2
3		2.8、3.4、3.4、3.2

随后，公司按优化改进后的工艺，进行了小批量试生产，共焊接了10件箱体，焊接完成后，检验人员对箱体4个面变形量进行了检测，结果见表3。由表3可知，箱体变形量为2.6~3.4mm，满足箱体总变形量≤3.5mm的要求。说明改进后的工艺方法正确、措施得当，改进效果明显。

9 结束语

通过对薄壁铝合金箱体焊接工艺试制和优化改进，最终生产出了合格的箱体，同时对薄壁铝合金箱体焊接积累了经验，结论如下。

- 1) 影响铝合金焊接变形的因素很多，其中铝合金本身的导热特性是产生变形的根本原因。
- 2) 合理的焊接参数可以在很大程度上减少焊接

(上接第31页)

[5] 王辉, 余地华, 管昌生, 等. 117大厦超厚板箱体单元现场拼装焊接的动态模拟[J]. 钢结构, 2013, 28 (7) : 63-66, 59.

[6] KNOEDEL P, GKATZOGIANNIS S, UMMENHOFER T. Practical aspects of welding residual stress simulation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 132: 83-96.

[7] 朱玉斌, 郭永环, 郭妍, 等. V型坡口多层多道焊温度场数值模拟[J]. 热加工工艺, 2017, 46 (17) : 207-209.

表3 箱体小批量生产变形量检测结果 (mm)

编号	箱体整体变形量要求	箱体4个面实测结果
1	≤3.5	3.3、3.4、3.4、3.2
2		3.4、2.7、3.0、3.2
3		3.0、3.4、3.2、3.2
4		2.8、3.0、3.2、3.2
5		3.4、3.0、3.4、3.4
6		3.2、3.3、3.0、3.2
7		2.6、3.3、2.4、3.4
8		2.9、3.2、2.8、3.3
9		3.0、3.4、2.7、3.2
10		3.0、3.2、2.8、3.2

变形量。

- 3) 焊接顺序是影响铝合金焊接变形的重要因素之一，合理调整零件焊接顺序可以有效减小变形。
- 4) 通过应用合理的防变形工装，可以有效减小铝合金焊接变形。
- 5) 铝合金焊接变形原因较多，焊接工艺必须长期持续优化改进，保证产品有较好的质量，同时保证最低的加工成本。

参考文献:

[1] 刘民东, 张月红, 吕学刚, 等. 大型复杂悬臂结构铝合金焊接变形控制研究[J]. 新技术新工艺, 2012 (6) : 80-82.

[2] 田昕. 面向焊接顺序优化的焊接变形仿真技术基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

[3] 刘志平, 王立夫. 铝合金部件焊接变形的产生及控制[J]. 焊接技术, 2007, 36 (5) : 52-53.

[4] 曲晓红, 郝彦荔. 城际动车组铝合金车顶制造技术及焊接工艺研究[J]. 装备制造技术, 2015 (2) : 126-127.

MW 20240516

[8] 张春侠, 吴桐, 徐海军. 箱板装配式钢结构焊接残余应力的数值模拟与研究[J]. 焊接技术, 2022, 51 (9) : 40-44.

[9] 赵卫平, 王振兴, 纪强溪, 等. 高强埋弧焊接圆钢管多层多道焊接数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54 (4) : 124-131.

[10] 徐坤, 范彩霞, 韩二阳, 等. 热源模型对Q420厚板焊接残余应力和变形预测精度的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (23) : 222-226.

MW 20240514