

# 铝合金焊接结构的应力松弛及控制

赵 征<sup>1</sup> 王艳芳<sup>2</sup>

(1 西安长峰机电研究所,西安 710065)

(2 陕西工业职业技术学院,咸阳 712000)

**文 摘** 针对生产现场大尺寸 5A06-H112 铝合金板箱形件拼焊制造过程中存在应力松弛的问题,对多种焊接工艺方法进行了研究。通过对不同焊接接头的力学性能试验、残余应力测试、焊接金相和硬度测量结果对比显示,铝合金焊接结构的应力变化存在先升后降的变化趋势,而 TIG 焊由于采用较小的线能量和多层焊,较 MIG 焊其应力松弛的程度存在差异。结果表明,增加焊后时效时间 8~10 d,并采用 TIG 焊技术将有效减小铝合金焊接结构的应力松弛,使端头下沉减少 50% 左右,满足了设计图纸的要求。

**关键词** 5A06-H112 铝合金,应力松弛,控制

## Stress Relaxation and Control Method on 5A06-H112 Al Alloy Welding Structure

Zhao Zheng<sup>1</sup> Wang Yanfang<sup>2</sup>

(1 Xi'an Changfeng Electromechanical Institute, Xi'an 710065)

(2 Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000)

**Abstract** Aimed at the stress relaxation of giant size welding assembly of 5A06-H112 aluminum alloy cabinet, several welding processes were studied. The TIG and MIG welded joint microstructures were examined out. The ultimate strengths, residual stresses and the hardness of the TIG joint were measured in comparison with the MIG welding. The results showed that the residual stress of the joint in the welding assembly of aluminum alloy relaxes following the descending-after-rising curve. Due to the lower energy input and multi-layer welding process, TIG has the different ability to reduce the stress relaxation contrasted with MIG. The method which combines TIG with extending 8 to 10 aging days enables the stress relaxation weakens, and confines the assembly's dimension stabilization finally.

**Key words** 5A06-H112 aluminum alloy, Stress relaxation, Control technique

### 0 引言

5A06-H112 铝合金具有高的比强度、断裂韧度、疲劳强度和耐腐蚀稳定性,并且具有良好的成形工艺性和良好的焊接性,因此成为在航天工业中应用最广泛的一类有色金属结构材料<sup>[1]</sup>。目前,越来越多的焊接方法,例如激光焊(Laser welding)、搅拌摩擦焊(FSW)、电阻焊(Resistance welding)以及脉冲熔化气体保护焊(MIG)等逐渐应用到铝合金焊接中来<sup>[2-3]</sup>。但受到生产成本、工艺水平等综合的影响,气体保护焊以其成熟稳定的技术、良好的焊缝质量、广泛的工艺适用性和容易实现自动化等特性,得到了越来越广泛的应用。

采用 5 mm 厚 Al-Mg 系 5A06-H112 铝合金板制造而成的箱式存储运输装置,为全焊接结构,产品总长 7 m,外观为边长 1 m 左右的方箱形式。箱体分为前中后三个箱段,中间采用两个中框焊接而成。箱式存储运输装置示意图如图 1 所示。生产过程中采用了内撑外压的焊接工装,工装上部配有带圆弧形形成槽的不锈钢垫板,并要求焊接装配前保证 2 mm 焊接间隙,以保证单面焊双面成型。焊接过程中大量采用了自动 MIG 焊,并要求工件多次翻转,以对称面排序对称焊接,以保证有效控制焊接变形并尽量减小焊接残余应力。

虽然生产过程中采取了多种工艺措施,但当焊接

收稿日期:2012-03-18

基金项目:陕西省教育厅 2011 年教学研究项目资助(11JK0819)

作者简介:赵征,1972 年出生,高级工程师,主要从事焊接材料、焊接变形控制方面的研究工作。E-mail:weldzz@163.com

结构箱体组焊完成后,依然发生了严重的应力松弛现象,箱体前端发生的下垂已经严重影响到了产品的使用。为此,需要研究铝合金焊接残余应力松弛现象,并采取有效措施控制焊接变形的产生,以满足产品的使用要求。

### 1 工艺试验

在方形储箱批量生产实践中,当对多台铝合金焊接结构箱体完成振动时效试验、气密实验和淋雨试验后,却意外的发现箱体前端发生了下垂。下垂量约为 7.2~9.6 mm,超差位置在图 1 所示左侧部位的下端。端框距离中框 2.5 m,框架的高度差导致该箱段为悬臂支撑,其余箱段为两端支撑,未发现端头下垂现象。

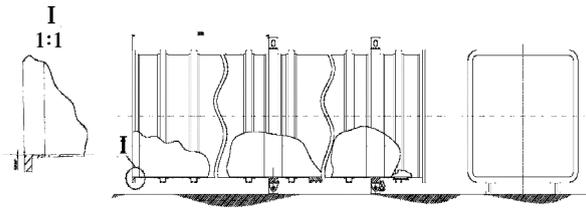


图 1 铝合金焊接结构示意图

Fig. 1 Aluminum alloy welding structure

根据文献[4-6]介绍,通过对 LY12、6063 等铝合金焊接试样采用光干涉试验进行的研究发现,焊件发生尺寸不稳定变形的原因主要与不稳定微观组织的变化及焊接残余应力的松弛有关。而据文献[7]介绍,通过采用相变分析的技术发现,焊缝中过饱和固溶体产生分解,其析出相的晶格常数不同而出现增加焊接变形的趋势,所以 5A06 焊接结构会出现继续增加变形的趋势。同时,作者也提出采用振动法或加热法可以进一步克服焊接结构的时效变形。也有学者开展了振动时效的工艺研究<sup>[8-9]</sup>,结果显示,振动时效的效果决定于振动规范(频率共振、频率阶段数、振幅、振动时间等)的选择,实践也证明,振动时效可以明显降低和均匀化焊接残余应力,但对该铝合金方箱进行了一次振动时效之后,由于振动时效消除残余应力的效果有限,零件中残存的残余应力会进一步进行松弛和再分布,从而引起零件的变形。由于该截箱段为悬空状态,在箱体前段自重的作用下,变形逐渐

在前端框下端面得到了较大的显现。故焊接变形量依然达不到设计图纸的要求。由此可见,铝合金焊接结构的应力松弛是一个客观现象,但难于根除,只能在一定程度上尽量减少。依据焊接残余应力是由于焊缝和近缝区金属在“力学熔点”及以下温度冷却收缩受到相邻金属的阻碍产生的,且焊后热既可实现无应力焊接和无应力无变形焊接,也可实现适当压应力无变形焊接和较大压应力微变形焊接<sup>[10]</sup>的观点,考虑到对该结构整体后热成本太高,但可以进一步优化焊接工艺,使之起到相同的效果。故本研究针对自动 MIG 焊和钨极氩弧焊(TIG)两种技术,通过对焊接接头的金相观察,残余应力测量、拉伸强度、硬度、弯曲等力学性能测试分析,对接头焊接变形量进行了综合评价。

### 1.1 材料

厚度为 5 mm 的 5A06-H112 铝合金名义成分和试样成分实测结果如表 1 所示,为冷作硬化状态。

表 1 焊接材料化学成分

Tab. 1 Chemical composition about welding material

	wt%							
成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
名义	0.40	0.40	0.10	0.5-0.8	5.8-6.8	0.20	0.02-0.1	余
实测	0.06	0.18	0.02	0.59	6.49	0.01	0.03	余

### 1.2 焊接工艺

采用 MIGATRONIC 公司的 Sigma 400 熔化极氩弧焊机和 Miller 公司的 Dynasty 350 氩弧焊机,保护气体为纯度 99.99% 的氩气。

焊接前,先用丙酮进行清洗,再用风动不锈钢丝轮清除坡口表面的氧化膜,然后用干净的棉纱擦拭干净。焊丝在焊前也要经过丙酮擦拭,以清除其表面灰尘、水分油污等杂物。

焊接工艺如表 2 所示。MIG 焊采用 I 字型坡口单道焊接,使用 ER5356( $\Phi 1.6$  mm)焊丝;TIG 焊试板开 60°、Y 型坡口,采用一层打底焊,一层盖面焊进行焊接,使用 S331( $\Phi 3$  mm)焊丝。焊后对试板进行 X 射线探伤,焊缝内部质量达到了 I 级要求。

表 2 5A06 铝合金 MIG 和 TIG 焊接工艺规范

Tab. 2 5A06 MIG and TIG welding parameter

焊接方法	焊接电压 /V	焊接电流 /A	焊接速率 /cm·min <sup>-1</sup>	氩气流量 /L·min <sup>-1</sup>	送丝速率 /m·min <sup>-1</sup>	焊接间隙 /mm	焊枪倾斜角 /(°)	焊嘴与工件 距离/mm
MIG 焊	23.4	190	38	20	6	2	75	5~12
TIG 焊	14.2	120~140	20	15	-	3	-	-

### 1.3 力学性能测试

采用 DLY-10A 万能材料试验机,按 GB2653 进

行弯曲试验,试样尺寸为 180 mm×20 mm×5 mm。测试数据见表 3。拉伸试验试样制备按生产条件的产品接头形式和 GB2651 进行,试验条件按 GB/T822 执行。测试数据见表 4 和表 5。

表 3 弯曲试验结果<sup>1)</sup>

Tab.3 Comparison of bending test data between MIG and TIG

TIG 焊		MIG 焊		母材弯曲 面弯角度/(°)背弯角度/(°)
面弯角度/(°)	背弯角度/(°)	面弯角度/(°)	背弯角度/(°)	
17	10.3	12.6	12.6	37.3

注:1)表中数据为 3 次测试的平均值。

表 4 自动 MIG 焊和手工 TIG 焊延伸试验结果<sup>1)</sup>

Tab.4 Comparison of extend test data between MIG and TIG

焊接方式	标记距离/mm	拉断后距离/mm
MIG 焊	60	61.68
TIG 焊	60	62.09

注:1)表中数据为 3 次测试的平均值。

表 5 焊接试样拉伸强度<sup>1)</sup>

Tab.5 Tensile strength of welding specimen MPa

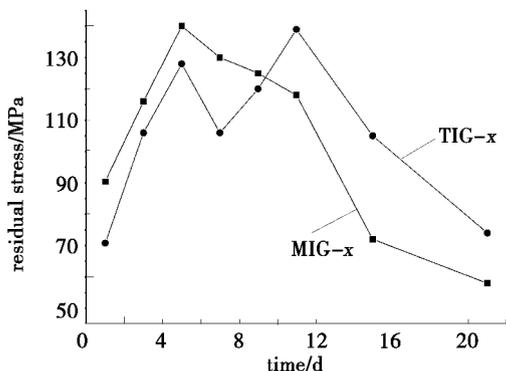
TIG 焊拉伸强度	MIG 焊拉伸强度
323	321

注:1)表中数据为 5 次测试的平均值。

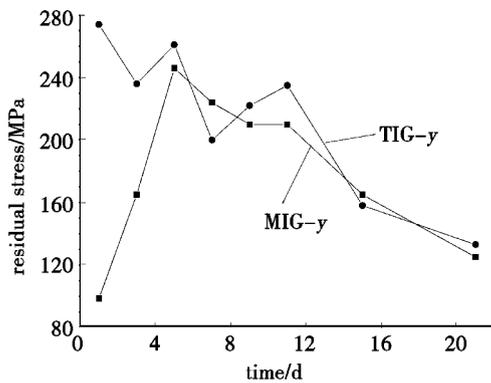
实验结果表明,两种焊接方法其拉伸强度都达到了母材拉伸强度( $\sigma_b \geq 315$  MPa)的 90% 以上。TIG 焊较 MIG 焊,其延伸率差距很小,面弯性能好于 MIG 焊。

#### 1.4 残余应力测试

残余应力的测量方法可分为机械释放和非破坏无损测量法两种<sup>[11]</sup>。针对 5A06 铝合金 MIG 和 TIG 焊接试样的残余应力可能存在的差异,制备了 5 mm×400 mm×300 mm 的试样,采用 ASM2-30 便携式多通道精密应变仪和 BE120-2CA-K 应变计,使用钻孔法对焊接试样  $x$  和  $y$  方向的残余应力进行了测试。测试从焊接完成之日起,连续测试 21 d(每隔一天测试一次,10 d 后适当拉大测试时间间距),共计 8 组数据。测试结果如图 2 所示。



(a)  $x$  方向



(b)  $y$  方向

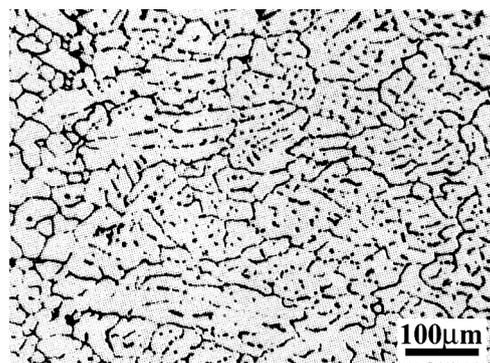
图 2 TIG 和 MIG 焊  $x$  和  $y$  方向焊缝中心残余应力测试结果

Fig.2 Residual stress on weld joint of 5A06 TIG and MIG welding specimen with aging days

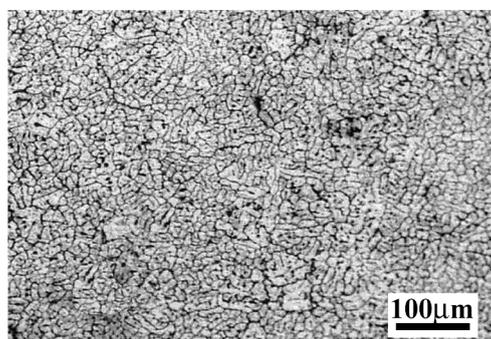
排除测量误差和焊接过程不稳定带来的影响,从图 2 可见,残余应力的变化趋势为,在开始的 4~5 d 残余应力逐步上升,之后逐步下降,直至 10 d 左右后稳定下降。第 4~5 d,残余应力达到峰值,焊缝方向的残余应力( $\sigma_x$ ),MIG 焊缝(140 MPa) > TIG 焊缝(128 MPa)。垂直于焊缝方向的残余应力( $\sigma_y$ ),TIG 焊缝(261 MPa) > MIG 焊缝(246 MPa)。

#### 1.5 焊缝金相

图 3 为 MIG 和 TIG 焊试样的金相照片。从图中可见,TIG 焊缝中晶粒比较粗大。而 MIG 焊试样在焊缝区域的晶粒明显细化,没有明显晶粒长大的情况。



(a) TIG 焊试样



(b) MIG 焊试样

图 3 TIG 和 MIG 焊试样金相照片

Fig.3 Metallograph of 5A06 TIG and MIG welding specimen

## 1.6 焊缝表面硬度测试

采用 TH160 里氏硬度计对焊缝正反面进行了测试。表 6 显示了焊接接头的硬度测量值。从表 6 可知, MIG 焊正反表面的平均硬度都比 TIG 焊的小。

表 6 焊缝表面硬度测量值<sup>1)</sup>

Tab. 6 Surface hardness of 5A06 welding specimen HL

TIG 焊焊缝的里氏硬度		MIG 焊焊缝的里氏硬度	
正面	背面	正面	背面
233	240	218	231

注:1)表中数据为 3 次测试的平均值。

## 2 结果分析

综上所述,影响箱式存储运输装置的端部下垂的因素主要有两方面,即力学因素和组织因素<sup>[12]</sup>,两者互相影响共同发生作用。由于该结构为整体焊接组件,焊缝总长约 60 m,焊接残余应力是必然存在的。箱体前段如果下沉 9.6 mm 左右,经过计算可知,在 2.5 m 内,焊缝松弛延长了 0.02 mm。其时效变形的规律是在开始的 4~5 d 残余应力逐步上升,之后逐步下降,直至 10 d 左右后稳定下降。

从力学因素角度进行分析可知,在焊缝中心位置,残余应力一般都为残余拉应力<sup>[13]</sup>。残余应力的存在导致了焊后尺寸不稳定的发生。残余应力越大,应力松弛的程度就越大。

对于薄板焊接来说,当被焊材料和接头形式确定,焊接温度场趋于稳定时,焊接热输入对高强铝合金接头组织和性能存在较大的影响<sup>[14]</sup>。对于薄板,采用薄板高速热源传热数学模型,其温度场可表示为<sup>[15]</sup>:

$$T(y_0, t) = \frac{q}{vh(4\pi\lambda c\rho t)^{1/2}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{y_0^2}{4at} + bt\right)\right] \quad (1)$$

式中, $a$  为热扩散率, $b$  为散温系数, $b = 2\alpha/c\rho h$ , $\alpha$  为表面散热系数, $h$  为板厚, $c$  为比热容, $\rho$  为材料密度, $\lambda$  为材料的热导率,使用  $q/v$  表示焊接线能量( $v$  为焊接速度), $y_0$  表示某点距离熔化边界的垂直距离。

不考虑散热问题,即  $b = 0$ ,取  $y_0 = 0$ ,可知其焊缝位置冷却速度  $\omega_c$  为

$$\omega_c = \frac{dT}{dt} = -2\pi\lambda c\rho \cdot \frac{(T - T_0)^3}{(q/vh)^2} \quad (2)$$

由式 2 可见,冷却速度主要受焊接线能量的影响。而焊缝区域的硬度很大程度上又取决于冷却速度(或冷却时间)。随冷却速度的增加,硬度也随之增加。显然,适当降低线能量可以改善焊接接头的力学性能。同时,焊接过程采用长段多层焊,由于多层焊比起单层焊具有更大的调节范围,它是许多单层焊循环联合在一起的综合作用,同时在相邻焊层之间彼此具有热

处理的作用,因此,从提高焊接质量来看,多层焊往往具有很大的优越性。TIG 焊焊接线能量稍小,焊接接头的力学性能得以改善,且较之 MIG 焊可能产生较小的纵向残余应力。但由于 TIG 焊焊接 5 mm 工件,采用一次打底,二次盖面的焊接工艺,垂直于焊缝方向的残余应力较大。所以,虽然 MIG 焊接头的显微组织比 TIG 焊接头具有更为细小的晶粒和焊接热影响区,从而有效提高了接头的综合力学性能,但 TIG 焊每焊一层都使焊接接头产生一次角变形,在根部引起一次拉伸塑性变形。多次塑性变形的积累,使这部分金属产生应变硬化致使硬度提高,从而导致虽然抗拉强度相当,但抗弯性能有少许差异的现象。

从组织因素角度分析可知,5A06-H112 铝合金为 Al-Mg 二元合金,其中 Mg 质量分数为 5.8%~6.8%,其二元相图如图 4 所示。Mg 与 Al 的半径相差不大;当 Mg 固溶于 Al 之中时,满足置换固溶体的条件,因而形成置换固溶体,Mg 原子半径较大,溶于 Al 的  $\alpha$  相之中并在 Al 原子附近的一定范围内造成晶格畸变,形成一弹性应力场,使固溶体晶格常数增加,晶格常数的增加量随 Mg 质量分数的增大而增大。在高温区 Mg 在 Al 中溶解度较大,并随温度下降而显著减小。由于焊接后焊件的冷却速度很快,所以焊缝及其附近区恢复到常温状态时合金的  $\alpha$  相处于过饱和状态。析出相  $\beta$ ( $Mg_2Al_3$ ) 在晶界呈网状大量析出,使  $\alpha$  固溶体的晶格畸变大大减小,晶格常数减小,从而使焊缝及附近区域在时效中体积有减小的趋势<sup>[16]</sup>。

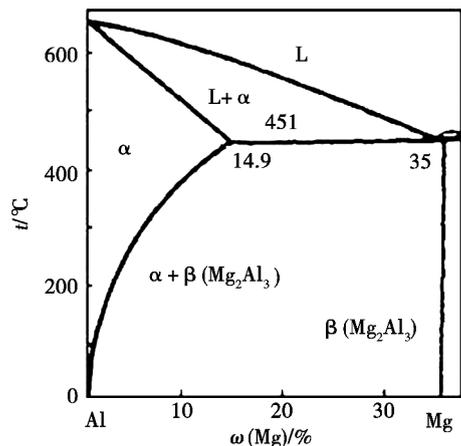


图 4 Al-Mg 二元合金相图

Fig. 4 Phase diagram of Al-Mg binary alloy

考虑到 TIG 焊对于应力松弛的程度差异于 MIG 焊,在方形储箱焊接结构的生产过程中,前箱段的连接焊缝采用了 TIG 焊进行施工。针对采用 TIG 焊的产品,对 5 台方形储箱箱体前端框位置尺寸进行了复测,具体测试位置见图 5。其中测试点 1~4 理论值为 141 mm。测试数据见表 7。

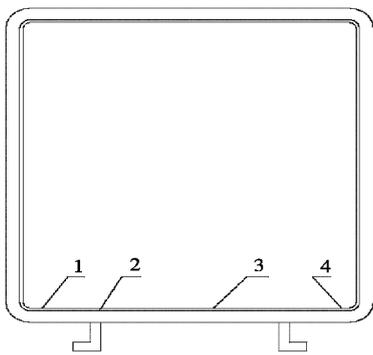


图5 方形储箱箱体复测位置示意图

Fig.5 Test position of Al alloy welding structure

表7 箱体前端测试值

Tab.7 Test results of Al alloy welding structure mm

次数	测试点1	测试点2	测试点3	测试点4
1	137	137	137.2	136.6
2	136.9	136.8	137.8	139.5
3	133.9	134	136.8	138.5
4	138.6	137.4	137.1	137.84
5	145.8	143.18	141	141.8

从上述结果来看,排除焊接装配导致的误差,在重力作用下,TIG焊接的产品端头下沉为5 mm左右,使变形量减少50%左右,且没有进一步发展的变化趋势,满足了设计要求。

### 3 结论

针对铝合金方箱焊接结构尺寸不稳定性的研究发现:

(1) 铝合金焊接结构的残余应力变化存在先升后降的变化趋势,即在开始的4~5 d内残余应力逐步上升,之后逐步下降,直至10 d后稳定下降。可见,铝合金焊接结构的焊后自然时效时间为8~10 d;

(2) TIG焊较MIG焊其应力松弛的程度存在差异。TIG焊由于采用较小的线能量和多层焊,端头下沉为5 mm左右,并且没有进一步发展的变化趋势,使变形量减少50%左右,有效减小了铝合金焊接结构的应力松弛。

### 参考文献

[1] ASM Metal Handbook, properties and selection; nonferrous alloys and special-purpose materials, ASM International[M]. Ohio, 1993:2

[2] 邓升斌,狄欧,何建国,等. LF6 铝合金薄板搅拌摩擦焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2004(12):29-30

[3] 戴文辉. 5A06-O 铝合金蒙皮的拼焊工艺[J]. 电焊机, 2004,34(4):27-29

[4] 刘雪松,田锡唐,徐文立. LY12 铝合金焊件尺寸不稳定性研究[J]. 材料科学与工艺, 1999,7(1):96-99

[5] 刘雪松,田锡唐. 6063 铝合金焊件尺寸不稳定性研究[J]. 轻合金加工技术, 1999,27(10):34-37

[6] 刘雪松,徐文立,方洪渊,等. LY12CZ 铝合金焊件在热循环作用下的尺寸不稳定性[J]. 焊接学报, 2004,25(3):82-84

[7] 柯新和. 铝合金焊接结构的尺寸稳定性[J]. 航天工艺, 1996(5):10-16

[8] 沈华龙,吴运新,郭俊康. 高强度铝合金厚板振动时效工艺的研究[J]. 振动与冲击, 2009,28(8):191-194

[9] 李云,陈东高,尚福军. 消除铝合金结构件焊接残余应力的工艺研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2003,26(1):62-64

[10] 王者昌. 焊接应力变形原理若干问题的探讨(二)[J]. 焊接学报, 2008,29(7):71-72

[11] Robinson J S, et al. Residual stress in 7449 aluminium alloy forgings [J]. Materials Science and Engineering A, 2010(527):2603-2612

[12] Marschall C W, Maringer R. Dimensional Instability an Introduction[C]//Pergamon, 1997:41-47

[13] 彭云,许良红,田志凌,等. 焊接热输入对高强铝合金接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2008,29(2):17-21

[14] Lefebvre F, et al. Micromechanical aspects of fatigue in a MIG welded aluminum airframe alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2005(397):338-345

[15] 张文钺. 焊接传热学[M]. 北京:机械工业出版社, 1989

[16] 刘雪松,田锡唐. LF3 铝合金焊件尺寸不稳定性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001,33(4):550-553

(编辑 吴坚)