

去应力退火对焊接结构件 残余应力与力学性能的影响与分析

王小博 张旭东 李昊丞

(北京航天新凤机械设备有限公司, 北京 100854)



摘要: 针对 5A06 铝合金圆筒形焊接结构件, 对其去应力退火热处理, 分别研究了去应力退火对其焊缝及焊缝附近表面横向残余应力、5A06 铝合金抗拉强度和焊缝抗拉强度的影响。试验结果表明: 120℃ 去应力退火和 180℃ 去应力退火对焊缝及焊缝附近的表面横向残余应力和 5A06 铝合金抗拉强度有降低效果, 但对焊缝的抗拉强度却基本没有影响。

关键词: 5A06 铝合金; 焊接结构件; 去应力退火; 表面残余应力; 抗拉强度

Influence and Analysis of Stress Relief Annealing for a Welded Structure on Residual Stress and Mechanical Properties

Wang Xiaobo Zhang Xudong Li Haocheng

(Beijing Aerospace Xinfeng Machinery Equipment Co., Ltd., Beijing 100854)

Abstract: In this paper, for the cylindrical welded structure of 5A06 aluminium alloy, the stress relief annealing is used for heat treatment of the welded structure. The effects of stress relief annealing on surface transverse residual stress near the weld, the tensile strength of 5A06 aluminium alloy and the tensile strength of the weld are studied. The experimental results indicate that when the annealing temperature is 120℃ and 180℃, the stress relief annealing not only reduces the surface transverse residual stress near the weld, but also reduces the tensile strength of 5A06 aluminium alloy. But the stress relief annealing has little effect on the tensile strength of the weld.

Key words: 5A06 aluminium alloy; welded structure; stress relief annealing; surface transverse residual stress; tensile strength

1 引言

焊接过程是一个对焊件局部加热而后逐渐冷却的过程, 这种不均匀加热冷却形成的温度梯度场将导致焊件各部分不均匀变形并在焊件内部产生内应力, 待焊件冷却后温度重新恢复到均匀状态, 该内应力将被残存下来形成残余应力^[1]。残余应力的存在对焊件结构的脆性破坏、疲劳破坏、应力腐蚀开裂以及尺寸稳定性都有不良的影响。尤其对于铝合金, 其热导率和线膨胀系数分别比钢大 1~2 倍, 焊接残余应力问题更加突出^[2]。因此, 采用各种有效措施减小或消除焊件内部

残余应力具有极其重要的意义。

目前, 常用的减小或消除焊件内部残余应力的措施有热处理法、振动时效法、锤击法、静拉伸法、超声波法等^[3]。其中, 热处理消除残余应力方法主要是去应力退火, 包括加热阶段和保温阶段, 在加热阶段, 金属材料的屈服强度会随着去应力退火温度的升高而降低, 当焊件内部的残余应力超过了该温度下金属材料的屈服强度, 则焊件会发生塑性变形, 使残余应力得到一定的缓和; 在保温阶段, 尤其在高温状态下, 金属材料会因发生蠕变现象(高温松弛)使得残余应力得到充分降低^[4]。

以 5A06 铝合金圆筒形焊接结构件为对象,对其去应力退火,采用超声波残余应力检测方法检测去应力退火前后纵向焊缝及焊缝附近表面的横向残余应力(所测残余应力方向与纵向焊缝方向平行),以研究去应力退火对焊接残余应力的影响;同时,检测去应力退火前后的 5A06 铝合金抗拉强度和纵向焊缝抗拉强度,以研究去应力退火对圆筒形结构件的力学性能影响。

2 试验材料与方法

2.1 试验试件

本试验所使用的试件为圆筒形焊接结构件,如图 1 所示,材料为铝合金 5A06,加工硬化状态,圆筒直径为 $\Phi 760\text{mm}$ 、壁厚为 3mm、长度为 1000mm,纵向焊缝的接头形式为对接(无坡口),采用钨极惰性气体保护焊单面焊双面成型工艺,试件数量为 3 件。

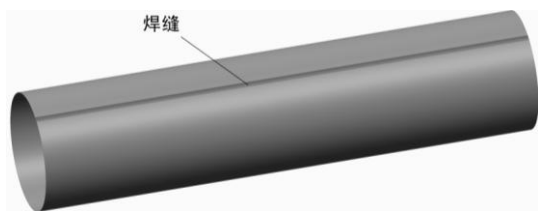


图 1 圆筒形焊接结构件图

2.2 试验过程

将加工完成的 3 件圆筒形试件编号 01#、02#和 03#, 分别对 3 件试件进行如下试验:

a. 01#试件: 对该试件 120℃去应力退火, 并采用超声波残余应力检测方法检测去应力退火前后焊缝及焊缝附近表面的横向残余应力(待测残余应力方向与焊缝方向平行), 检测点 18 个(检测点连线与焊缝方

向垂直), 具体如图 2 所示; 同时, 在去应力退火后的试件上截取 5A06 铝合金抗拉试片 10 件、纵向焊缝抗拉试片 8 件, 并检测试片的抗拉强度。其中, 120℃去应力退火规范: 120℃热处理, 保温 4h, 空冷。

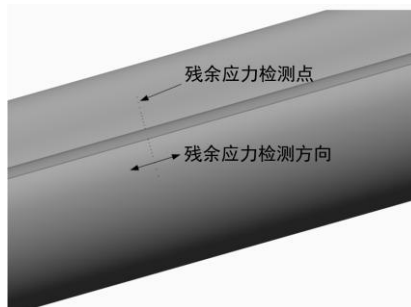


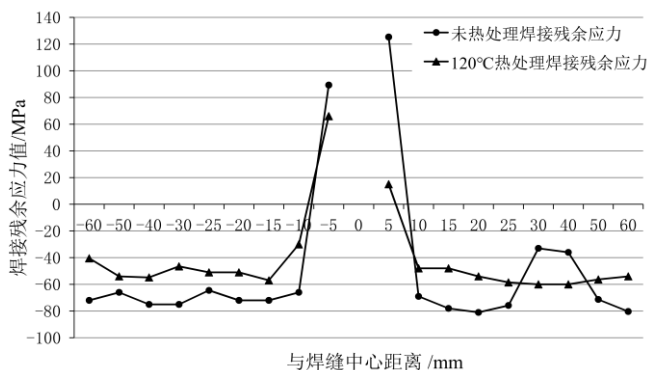
图 2 残余应力检测位置与方向

b. 02#试件: 对该试件 180℃去应力退火, 并采用超声波残余应力检测方法检测去应力退火前后焊缝及焊缝附近表面的横向残余应力(待测残余应力方向与焊缝方向平行), 检测点 18 个(检测点连线与焊缝方向垂直), 如图 2 所示; 同时, 在去应力退火后的试件上截取 5A06 铝合金抗拉试片 10 件、纵向焊缝抗拉试片 8 件, 并对试片的抗拉强度进行检测。其中, 180℃去应力退火规范: 180℃热处理, 保温 4h, 空冷。

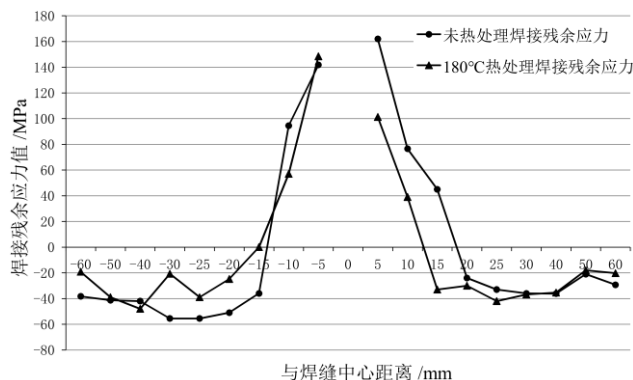
c. 03#试件: 对该试件不去应力退火, 在该试件上截取 5A06 铝合金抗拉试片 10 件、纵向焊缝抗拉试片 8 件, 并检测试片的抗拉强度。

3 试验结果与分析

3.1 纵向焊缝及焊缝附近的表面横向残余应力检测与分析



a 01#试件 120℃去应力退火前后



b 02#试件 180℃去应力退火前后

图 3 焊缝及焊缝附近表面横向残余应力对比图

表1 去应力退火前后焊缝及焊缝附近表面的横向残余应力值

与焊缝中心的距离/mm	01#试件		02#试件	
	未去应力退火表面 残余应力/MPa	120℃去应力退火后表面 残余应力/MPa	未去应力退火表面 残余应力/MPa	180℃去应力退火后表面 残余应力/MPa
-60	-72	-40.5	-38.3	-19.2
-50	-66	-54	-41.3	-39
-40	-75	-54.8	-42	-48
-30	-75	-46.5	-55.5	-20.7
-25	-64.5	-51	-55.5	-39
-20	-72	-51	-51	-24.8
-15	-72	-57	-36	0
-10	-66	-30	94.5	57
-5（焊趾处）	89.3	66	141.8	148.5
0（焊缝中心）	-	-	-	-
5（焊趾处）	125.3（误差较大）	15（误差较大）	162	101.3
10	-69	-48	76.5	39
15	-78	-48	45	-33
20	-81	-54	-24	-30
25	-75.8	-58.5	-33	-42
30	-33	-60	-36	-36.8
40	-36	-60	-36.2	-35.4
50	-71.3	-56.3	-21	-18
60	-80.3	-54	-29.3	-20.3
残余应力绝对值的平均值	72.3	50.3	56.6	43.1

图 3a 所示为 01#试件 120℃去应力退火前后的焊缝及焊缝附近表面横向残余应力对比图，图 3b 所示为 02#试件 180℃去应力退火前后的焊缝及焊缝附近表面横向残余应力对比图。01#试件 120℃去应力退火前后与 02#试件 180℃去应力退火前后的焊缝及焊缝附近表面横向残余应力检测值如表 1 所示，表中正值表示拉应力，负值表示压应力。

由表 1 和图 3a 可知，01#试件的焊缝及距离焊缝中心约 10mm 范围内的表面横向残余应力为拉应力，其他区域为压应力；01#试件经过 120℃去应力退火后，除个别点外，其它检测点的表面横向残余应力发生减小，即残余应力绝对值的平均值降低 22MPa，约 30.4%；同时，01#试件经过 120℃去应力退火后，其焊缝及焊缝附近的表面横向残余应力呈均匀化分布的特点。

由表 1 和图 3b 可知，02#试件的焊缝及距离焊缝中心约 15mm 范围内的表面横向残余应力为拉应力，其他区域为压应力；02#试件经过 180℃去应力退火后，除个别点外，其它检测点的表面横向残余应力减小，即残余应力绝对值的平均值降低 13.5MPa，约 27.4%；同时，02#试件经过 180℃去应力退火后，其焊缝及焊缝附近的表面横向残余应力呈均匀化分布的特点。

由以上分析可知，120℃去应力退火和 180℃去应力退火对圆筒形焊接结构件的纵向焊缝残余应力都有降低效果，其降低残余应力的主要原因是圆筒形焊接结构件在去应力退火加热过程中，其焊缝及焊缝附近材料的屈服强度会随着去应力退火加热温度的升高而降低，当焊缝及焊缝附近的残余应力超过该温度下的材料屈服强度时，焊缝及焊缝附近的材料会发生塑性变形，使得残余应力发生缓和，即造成残余应力发生有限的降低。但是，120℃去应力退火和 180℃去应力退火对圆筒形焊接结构件的纵向焊缝残余应力的降低效果却相差不大，这主要是去应力退火温度较低造成的，即当去应力退火温度较低时，焊缝及焊缝附近材料在保温阶段不会发生高温蠕变现象，也就不会产生高温蠕变引起的应力松弛或残余应力降低，同时圆筒形焊接结构件的结构约束对去应力退火后残余应力的降低效果也有一定的影响。

3.2 5A06 铝合金的抗拉强度检测与分析

01#试件 120℃去应力退火、02#试件 180℃去应力退火和 03#试件未去应力退火的 5A06 铝合金抗拉强度检测值如表 2 所示。

表2 去应力退火前后5A06铝合金抗拉强度

序号	抗拉强度值/MPa		
	01#试件 (120℃去应力退火)	02#试件 (180℃去应力退火)	03#试件 (未去应力退火)
1	412	402	447
2	414	406	448
3	408	400	454
4	414	407	455
5	414	407	440
6	414	405	452
7	415	406	451
8	412	407	456
9	414	408	456
10	412	407	456
平均值	412.9	405.5	451.5

由表 2 可知,圆筒形焊接结构件的 5A06 铝合金原材料在经过去应力退火后,其抗拉强度会有所减小。相比于 03#试件,01#试件在经过 120℃去应力退火后其 5A06 铝合金原材料的抗拉强度平均值降低 38.6MPa,约 8.55%,02#试件在经过 180℃去应力退火后其 5A06 铝合金原材料的抗拉强度平均值降低 46MPa,约 10.19%。对于去应力退火会降低 5A06 铝合金材料抗拉强度,其原因可能是在去应力退火过程中,材料内部发生了部分回复与强化相 β 相析出,使得材料内部的晶格畸变与晶格缺陷减少,晶粒长大,致使材料的抗拉强度降低,尤其在保温时间不变的情况下,其铝合金材料的抗拉强度会随着去应力退火温度的升高而逐渐降低^[5, 6]。

3.3 纵向焊缝的抗拉强度检测与分析

01#试件 120℃去应力退火、02#试件 180℃去应力退火和 03#试件未去应力退火的纵向焊缝抗拉强度检测值如表 3 所示。由表 3 可知,相比于 03#试件,01#试件在经过 120℃去应力退火后其焊缝的抗拉强度平均值增大 4.7MPa,约 1.3%;02#试件在经过 180℃去应力退火后其焊缝的抗拉强度平均值降低 3.3MPa,约 0.9%,即圆筒形焊接结构件的纵向焊缝在经过去应力退火后,其焊缝抗拉强度基本上不发生变化。5A06 铝合金作为非热处理强化铝合金,其材料的力学强度主要通过形变强化来实现。因此,焊接接头力学性能的变化主要是由高温焊接热循环对焊接接头材料形变强化的影响决定的,而去应力退火(低温退火)对焊接

接头力学性能的影响并不大^[6]。

表3 去应力退火前后纵向焊缝抗拉强度

序号	抗拉强度值/MPa		
	01#试件 (120℃去应力退火)	02#试件 (180℃去应力退火)	03#试件 (未去应力退火)
1	370	362	370
2	376	356	372
3	376	347	371
4	374	376	368
5	375	367	371
6	375	357	374
7	370	356	370
8	338	369	319
平均值	369.3	361.3	364.6

4 结束语

- a. 圆筒形焊接结构件经过 120℃去应力退火和 180℃去应力退火后,其纵向焊缝及焊缝附近的表面横向残余应力会降低,分别降低约 30.4%和 27.4%,但降低效果相差不大;同时,去应力退火对焊缝及焊缝附近的表面横向残余应力的分布有均匀化效果;
- b. 圆筒形焊接结构件经过 120℃去应力退火和 180℃去应力退火后,其 5A06 铝合金的抗拉强度会发生降低,分别降低约 8.55%和 10.19%;
- c. 圆筒形焊接结构件经过 120℃去应力退火和 180℃去应力退火后,其纵向焊缝的抗拉强度基本不发生变化。

参考文献

1 周万盛,姚军山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京:机械工业出版社,2006: 96~122

2 桑晓宏. 铝合金厚壁筒形结构件焊接工艺研究[J]. 航天制造技术, 2004 (5): 1~4

3 张国柱. 应力消除技术研究现状与发展[J]. 科技资讯, 2011(5): 121

4 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京:机械工业出版社, 2008: 114~118

5 孙卫国,徐贺年,姜文举,等. 改善 5A06-O 铝合金板材性能的研究[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(12): 26~28

6 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 382~394