

# 调修温度对6005A铝合金焊接接头组织及性能的影响

宋业恒<sup>1</sup>, 孙维光<sup>1</sup>, 马传平<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛

<sup>2</sup>西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都

Email: songyeheng@cqsf.com, sunweiguang@cqsf.com, 414677984@qq.com

收稿日期: 2021年3月4日; 录用日期: 2021年4月19日; 发布日期: 2021年4月26日

## 摘要

以轨道交通常用的6005A铝合金焊接接头为研究对象, 采用200℃、230℃和250℃对6005A铝合金焊接接头进行火焰调修, 研究不同调修温度对铝合金焊接接头微观组织及力学性能的影响。研究表明: 随着调修温度的升高, 6005A铝合金焊接接头的抗拉强度和断后伸长率均呈一定程度的下降。不同调修温度下, 焊接接头的微观组织变化不大, 焊接接头的硬度分布规律相同, 相较于其他调修温度接头, 250℃调修接头软化区宽度略有增加。

## 关键词

火焰调修, 温度, 6005A铝合金, 微观组织, 力学性能

# Effect of Flame Heat Repair Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of 6005A Aluminum Alloy Welded Joints

Yeheng Song<sup>1</sup>, Weiguang Sun<sup>1</sup>, Chuanping Ma<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

<sup>2</sup>College of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Email: songyeheng@cqsf.com, sunweiguang@cqsf.com, 414677984@qq.com

Received: Mar. 4<sup>th</sup>, 2021; accepted: Apr. 19<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 26<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The 6005A aluminum alloy welded joint commonly used in rail transit was taken as the research

object. Flame heat repair of 6005A aluminum alloy welded joints was carried out at 200°C, 230°C and 250°C, and the effects of different flame heat repair temperatures on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloy welded joints were studied. The research results show that with the increase of the flame heat repair temperature, the tensile strength and the elongation after fracture of the 6005A aluminum alloy welded joints both decrease to a certain extent. Under different flame heat repair temperatures, the microstructure of welded joints does not change much, and the hardness distribution of welded joints is the same. Compared with other flame heat repair temperature joints, the width of the softened zone of 250°C adjusted joints is slightly increased.

## Keywords

Flame Heat Repair, Temperature, 6005A Aluminum Alloy, Microstructure, Mechanical Properties

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

6005A 铝金属 Al-Mg-Si 系铝合金, 因其具有中等强度, 挤压性和耐蚀性良好等特点, 非常适于制造轨道车辆车体主体结构用的复杂截面多孔中空型材, 从而被广泛应用于车体的生产制造[1][2]。铝合金由于热导率和热膨胀系数高, 焊接后容易出现焊接变形问题, 影响车体结构的稳定性。在现有高速铝合金车体生产制造过程中, 虽然采取了很多焊前和焊接过程控制工艺措施, 但焊后仍会存在一定的焊接变形, 当残余变形量超过生产技术要求时, 往往需要在焊后进行机械矫正和热调修矫正[3][4]。热调修矫正作为一种焊接变形的矫形方法, 是在焊接构件选定的区域按一定的方向进行火焰加热, 使该区域的金属产生压缩塑性变形, 冷却时产生收缩, 进而调整焊件最终形状。这种方法操作简单, 在高速列车车体生产中有广泛的应用。焊后火焰调修可以控制焊接变形, 同时也会引起材料组织性能和残余应力的变化, 热调修不当甚至会造成焊接构件的使用性能降低[3][4][5][6]。高速列车用 6005A 铝合金属于可热处理强化铝合金, 热调修方法必须严格控制额外的热输入, 避免产生焊接接头严重软化, 影响车体的服役安全[5][6][7]。不同温度下火焰调修的铝合金焊接接头组织及性能如何变化是亟待解决的问题, 因此研究调修温度对 6005A 铝合金焊接接头组织与性能的影响, 对指导铝合金车体生产制造具有重要的工程实际意义。

## 2. 材料及试验方法

试验材料采用 6005A-T6 铝合金中空型材(见图 1), 板厚 3 mm, 单边自带有 35° V 型坡口, 型材挤压成型时已有 1 mm 钝边, 组对间隙为 0~1 mm, 且自带永久垫板。焊接方法为 MIG 焊, 所用焊丝牌号为 ER5356, 焊丝直径为 1.2 mm, 焊接保护气为高纯氩。焊接工艺参数为: 焊接电压 21~22 V, 焊接电流 220~230 A, 焊接速度 800 mm/min, 单道焊接成型。6005A-T6 铝合金和焊丝的化学成分见表 1。焊后采用氧乙炔火焰加热焊接接头区域, 加热温度分别为 200°C、230°C 和 250°C, 为了减小热量对工件的影响及降低热量在工件上的传递范围, 冷却方式采用水冷降温。热调修后, 利用线切割机对焊接接头进行金相、拉伸、弯曲、硬度试样的加工取样。采用型号为 AX10 ZEISS 的蔡司光学显微镜观察焊接接头金相组织。拉伸试验参照 GBT 2651-2008 焊接接头拉伸试验方法和 GB/T 228-2010 金属材料室温拉伸试验方法制成矩形横截面拉伸试样。采用 DNS300 微机控制电子万能试验拉伸机进行焊接接头的拉伸试验和弯

曲试验, 拉伸速度为 3 mm/min, 按标准 GB/T 2653-2008 焊接接头弯曲试验方法根据试板的厚度选取试验跨距和压头直径, 弯曲角度为 180°。在距离焊接接头上表面 1 mm 处布置测试线, 用 HVS-30D 维氏硬度计测量焊接接头各区域的硬度值, 测量载荷为 1 kg, 载荷持续时间为 15 秒, 硬度点之间的间隔距离为 1 mm, 测试方向为从焊缝中心向母材方向。

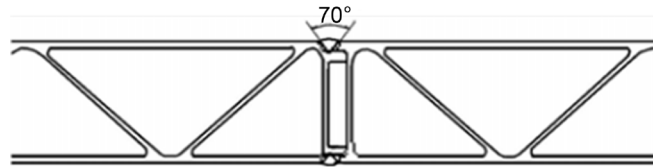


Figure 1. 6005A-T6 extruded hollow profile structure diagram  
图 1. 6005A-T6 挤压中空型材结构示意图

Table 1. Chemical composition of 6005A aluminum alloy and ER5356 welding wire (wt%)  
表 1. 6005A 铝合金与 ER5356 焊丝的化学成分(wt%)

牌号	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Al
6005A-T6	0.6-0.9	0.4-0.6	<0.35	<0.30	<0.10	<0.10	<0.10	余量
ER5356	≤0.25	≤0.10	≤0.10	0.05~0.2	4.5~5.5	0.05~0.2	≤0.10	余量

### 3. 试验结果及分析

#### 3.1. 调修温度对接头组织的影响

图 2 和图 3 分别为不同调修温度下焊接接头焊缝及熔合区的微观金相组织。从图 2 可以看出, 未调修和不同调修温度下的接头焊缝均为树枝状铸态结晶组织, 在光学显微镜下各温度加热调修后的焊缝组织与未调修焊缝组织相比没有出现明显差别。这主要是因为焊接过程中, 焊缝中心经历了极高的热循环, 热调修温度在没有超过焊缝中心之前的温度情况下, 不会对焊缝金相组织造成明显的影响。从图 3 可以看出, 各调修温度下熔合区靠近焊缝侧的组织均呈铸态枝晶状, 靠近 HAZ 侧晶粒较大, 但从所观察到的区域来看, 与未调修接头相比, 3 种调修温度下靠 HAZ 侧的晶粒尺寸未发生明显的长大。

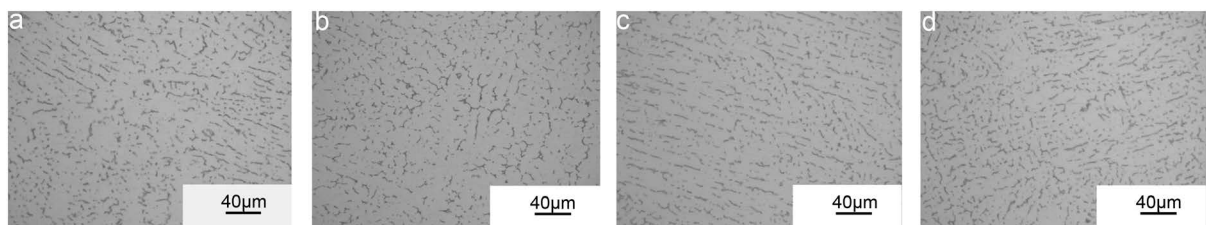


Figure 2. Weld joint microstructure in flame heat repair temperatures. (a) No heating; (b) 200°C; (c) 230°C; (d) 250°C  
图 2. 不同调修温度条件下焊缝金相组织

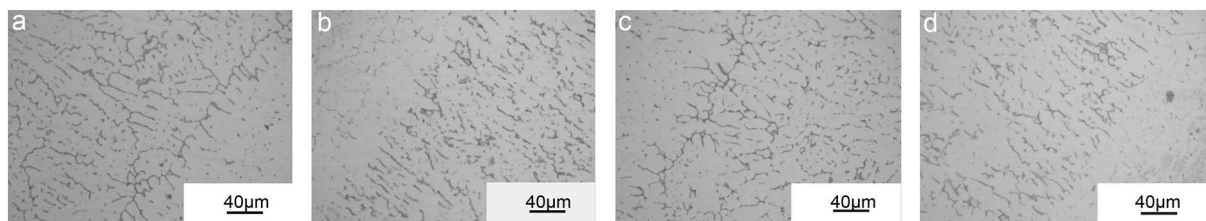


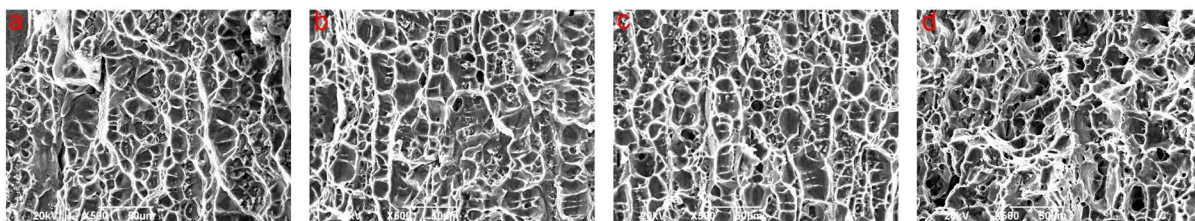
Figure 3. Fusion zone microstructure in flame heat repair temperatures. (a) No heating; (b) 200°C; (c) 230°C; (d) 250°C  
图 3. 不同调修温度条件下熔合区金相组织

### 3.2. 调修温度对接头拉伸性能的影响

表 2 为未调修和不同调修温度条件下的 6005A-T6 铝合金焊接接头的拉伸试验结果(表中抗拉强度平均值和断后伸长率平均值均为 3 个平行样的平均值), 图 4 为未调修和不同调修温度条件下接头拉伸断口的扫描电镜(SEM)形貌。表 2 可以看出, 经过不同温度调修的接头抗拉强度和断后伸长率均低于未调修接头, 且随着调修温度的升高, 接头抗拉强度和断后伸长率呈下降趋势, 但仍然高于标准 155 MPa 的要求。所有的焊接接头均断于热影响区(HAZ), 距离焊缝中心约 10 mm 处, 虽然焊缝的熔敷金属强度略低于母材, 但是 MIG 焊和焊后热调修均会使热影响区产生多次热循环, 导致双重的软化现象致使焊接接头其强度降低较大, 故而热影响区成为整个 6005A-T6 铝合金焊接接头最为薄弱的环节。图 4 可以发现, 所观察的 4 种条件下的接头断口均呈现为典型的韧窝断口, 未调修、200℃和 230℃调修温度下的接头断口形貌并无特别明显的区别, 250℃调修温度的接头断口韧窝直径要小于未调修接头, 一般韧窝尺寸越大, 说明在形成韧窝的过程中发生的塑性变形更严重, 变形更充分, 那么断裂过程中会吸收更多的能量, 材料的韧性就越好。

**Table 2.** Tensile test results  
**表 2.** 拉伸试验结果

调修温度	抗拉强度平均值/MPa	断后伸长率平均值/%	断裂部位
未调修	203	7.01	HAZ
200 °C	195	6.52	HAZ
230 °C	190	6.23	HAZ
250 °C	181	5.98	HAZ



**Figure 4.** SEM morphology of tensile fracture under different adjustment temperature conditions. (a) No heating; (b) 200°C; (c) 230°C; (d) 250°C

**图 4.** 不同调修温度条件下拉伸断口 SEM 形貌

### 3.3. 调修温度对接头硬度的影响

图 5 为未调修和不同调修温度接头的硬度分布曲线。从图中可以发现, 4 种接头的硬度曲线分布规律基本相同, 即母材区硬度 > 热影响区淬火区硬度 > 焊缝区硬度 > 过时效软化区硬度。随着远离焊缝中心, 接头的硬度由焊缝区过渡到热影响区淬火区硬度值升高, 由热影响区淬火区过渡到过时效软化区硬度值降低, 再由过时效软化区过渡到母材区硬度值升高。其中过时效软化区的硬度最低值约为 60 HV, 低于焊缝区的硬度值, 成为整个焊接接头最薄弱的区域[8], 接头拉伸试验的断裂部位正好也位于该区域, 从而验证了这一点。这是由于 6005A-T6 铝合金为可热处理强化铝合金, 在焊接过程中会产生软化现象, 主要原因是热影响区在焊接高温作用下强化相会脱溶析出并聚集长大, 使强化效果减弱, 产生“过时效”现象, 并形成软化区[9]。因为随着距焊缝中心的距离增加, 距离焊缝中心较远的热影响区的温度会逐渐降低, 热循环温度虽然比原有时效处理温度高, 但又未达到固溶温度, 强化相高温溶解不充分且析出数量少, 并且原有未溶解的过渡强化相  $\beta'(Mg_2Si)$  也因为焊接热循环的影响而聚集长大, 转变为稳定的



$\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$ 强化相, 由于析出的和长大的强化相粒子粒径不均匀, 强化效果弱, 从而形成过时效软化区, 就使 6005A-T6 铝合金焊接接头的强度和硬度明显降低[10], 所以该区域的显微硬度最低, 拉伸时也因强度降低而最先断裂。从图 5 中还可以发现 250℃调修接头的软化区宽度要略大于未调修和其他调修温度接头的软化区宽度, 说明调修温度越高, 受到热循环的影响, 6005A-T6 铝合金接头的软化区会变宽。这是因为调修温度越高, 高温停留时间越长, 强化相越容易脱溶析出并聚集长大, 同时受到调修温度影响的区域越宽, 使得软化区变宽。

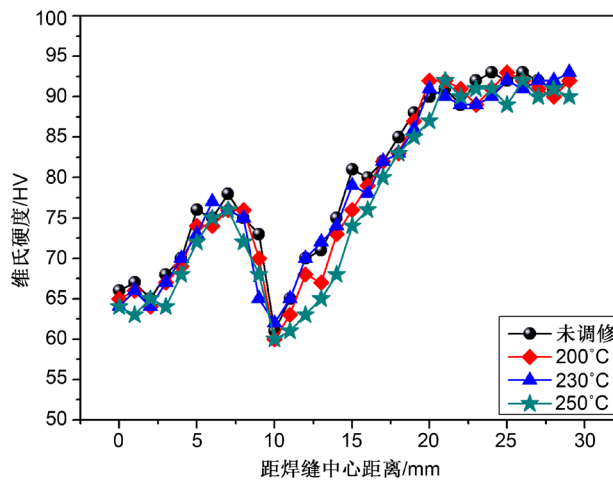


Figure 5. The hardness distribution curves of joints at different adjustment temperatures  
图 5. 不同调修温度接头硬度分布曲线

### 3.4. 调修温度对接头弯曲性能的影响

通过对未调修和不同调修温度的焊接接头进行面弯和背弯试验, 发现所有焊缝均能达到弯曲试验标准, 未发现明显的弯曲裂纹, 说明接头的弯曲性能良好。这说明在本文中的调修温度下, 热调修不会影响焊接接头的弯曲性能。

## 4. 结论

通过采用 200℃、230℃和 250℃对 6005A 铝合金焊接接头进行火焰调修, 并与未调修接头的组织和基本力学性能进行对比, 得出以下结论:

- 1) 随着调修温度的升高, 与未调修接头相比, 焊缝和熔合区的微观金相组织未发生大的变化。
- 2) 经过不同温度调修的接头抗拉强度和断后伸长率均低于未调修接头, 且随着调修温度的升高, 接头抗拉强度和断后伸长率呈一定程度的下降趋势, 但仍然高于标准 155 MPa 的要求。
- 3) 在所采用的调修温度中, 硬度曲线分布规律基本相同。但 250℃调修接头的软化区要略大于未调修和其他调修温度接头的软化区宽度。
- 4) 从实验的结果来看, 200℃、230℃和 250℃调修温度均可用于生产实际的变形调修中, 不过调修温度采用 200℃最佳。

## 参考文献

- [1] 陈刚辉, 张向钧, 路伟. 不同打磨状态对 6005A-T6 铝合金 MIG 焊接头组织及力学性能的影响[J]. 电焊机, 2020, 50(5): 89-93.
- [2] 郑国华, 王红良, 吴亚, 等. 地铁车体用 6005A-T6 铝合金板材的疲劳性能研究[J]. 材料开发与应用, 2020, 35(4):

- 14-23.
- [3] 姜澜, 魏绪钧, 姚广春, 等. 火焰加热温度对 6005A 铝合金焊接接头性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(4): 365-367.
  - [4] 刘小松, 戴忠晨, 赵佳佳, 等. 调修次数对铝合金焊接接头力学性能及微观组织的影响[J]. 焊接技术, 2018, 47(7): 54-56.
  - [5] 张亚, 渐春光. 铝合金焊接变形的火焰调修技术研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(5): 206-208.
  - [6] 郑潇泉. 热调修工艺对 6061 焊接接头组织与性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学材料科学与工程学院, 2019.
  - [7] 熊志亮. 热矫形温度对高速列车铝合金接头组织与性能的影响机制[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 2014.
  - [8] 朱瑞栋, 马传平, 徐晓龙. A6N01 铝合金 CMT 焊接接头组织与性能研究[J]. 电焊机, 2018, 48(5): 76-79.
  - [9] 侯振国, 杨冠华, 由晓娇, 等. 热调修对 6082-T6 铝合金焊接接头组织与力学性能的影响[J]. 焊接技术, 2015, 44(11): 23-25.
  - [10] 杨尚磊, 林庆琳. A6N01 铝合金焊接接头的微观组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(10): 2720-2725.