

# 高速列车用 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊工艺研究

田志骞, 张铁浩

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111)

**摘要:** 研究了工艺参数对 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头焊缝成形、微观组织以及力学性能的影响。结果表明, 焊接速度以及搅拌头转速对接头力学性能具有明显影响。在焊接速度一定时, 随着转速提高, 接头力学性能提高, 这与焊核区和热机影响区的固溶强化和塑性变形导致的位错密度增加有关; 继续增大转速, 接头力学性能下降, 这是由于过大的热输入导致接头产生过时效现象。热影响区一直存在过时效现象导致其为接头的薄弱区域, 拉伸试样断裂于该区域。在转速一定时, 接头力学性能随焊接速度增大而增大。在本实验条件下, 抗拉强度最大值为 238 MPa, 最小为 214 MPa, 分别达到母材的 82.1%、73.8%。

**关键词:** 6005A 铝合金; 搅拌摩擦焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1006-0316.2017.11.016

文章编号: 1006 - 0316 (2017) 11 - 0063 - 06

## Study on the Friction Stir Welding Technology of 6005A-T6 Aluminium Used for High-Speed Train

TIAN Zhiqian, ZHANG Tiehao

(CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

**Abstract:** The influences of welding parameters on weld formation, microstructure and mechanical properties were studied systematically for 6005A-T6 friction stir welded joint. The results show that the welding speed and rotation speed have a significant effect on welded joints. At a certain welding speed, the mechanical properties were improved with increasing rotation speed. This is attributed to enhancement of solid-solution strengthening and dislocation density due to plastic deformation. Further increasment of rotation speed led to the decrease of mechanical property, which was caused by the overaging of WZ and TMAZ due to excessive heat input. HAZ was the weak zone of welded joint because of overaging, in which the tensile specimens were all fractured. With increasing welding speed, the mechanical property increased at a certain rotation speed. The maximum and minimum tensile strength are 238 MPa and 214 MPa, which is 82.1% and 73.8% of the strength of base metal respectively.

**Key words:** 6005A aluminium alloy; friction stir welding; microstructure; mechanical property

随着轨道交通行业的发展, 为满足车辆轻量化、节能环保等要求, 铝合金在高速列车上得到广泛应用。6005A-T6 是一种可热处理强化的 Al-Mg-Si 系铝合金, 是当前我国高速列车制

造的主要材料<sup>[1]</sup>。由于目前轨道车辆车体制造主要采用熔焊方法, 因此对热处理强化的铝合金来说会导致接头力学性能的大大下降; 另一方面, 由于受铝合金材料自身物理性质的影响,

收稿日期: 2017 - 04 - 01

作者简介: 田志骞 (1985 - ), 男, 山东潍坊人, 本科, 工程师, 主要从事铝合金焊接技术方面的工程和研究工作。

如易氧化、比热和热导率大、热膨胀系数高等，焊接过程中常出现气孔、裂纹、夹杂等缺陷，严重影响高速列车运行的安全以及寿命。

搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 是英国焊接研究所提出的一种固相连接技术，被广泛应用于铝合金焊接<sup>[2-3]</sup>。其焊接过程中母材温度低于熔点，因此可有效避免熔化焊过程中的气孔、裂纹等缺陷，提高铝合金焊接质量。

本文针对高速列车用 6005A-T6 铝合金，系统研究了工艺参数对焊缝成形以及力学性能的影响，为搅拌摩擦焊工艺在高速列车上的生产应用提供技术基础。

## 1 试验材料及方法

试验材料选用国产 6005A-T6 型材，其抗拉强度 290 MPa、屈服强度 247 MPa、断后延伸率 14%，化学成分如表 1 所示。

表 1 6005-T6 铝合金化学成分 (质量分数%)

Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Cr	Zn	Ti	Al
0.6	0.6	0.13	0.19	0.03	0.15	0.02	0.04	Bal.

试验设备采用美国 MTI RM2-2335 型数控静龙门式搅拌摩擦焊机，最大转速 3000 r/min。搅拌头为圆锥三平面搅拌头，搅拌针长度 3.88 mm，轴肩直径 12 mm，轴肩平面上布置 3 段呈 120°均匀分布的凹槽，凹槽断面为半圆形；搅拌头材料为超高强度马氏体时效钢。接头形式为自带垫板的对接接头，接头厚度为 4.3 mm，接头两侧各设 0.3 mm 厚和 5 mm 宽的工艺凸台，接头形式如图 1 所示。

焊接过程中保持搅拌头倾角为 0.5°，压入量为 0.1 mm，研究不同焊接速度以及搅拌头旋转速率下的焊缝成形以及力学性能，具体焊接工艺参数如表 2 所示。

焊后首先根据文献<sup>[4]</sup>进行焊缝断面宏观检测，观察焊缝内部有无孔穴 (隧道)、未焊透、弯钩等缺陷。取表面成形良好、无内部缺陷的

接头进行拉伸试验和显微硬度测试。试样准备和拉伸试验按照文献<sup>[5]</sup>进行，每组参数取拉伸试验 4 件，取其平均值作为最终强度值。按照文献<sup>[6]</sup>进行显微硬度试验，测试位置包括焊缝热影响区 (HAZ)、热机影响区 (TMAZ) 和焊核 (WN)；每个样件测 30 个点，测试位置为焊缝厚度中心。

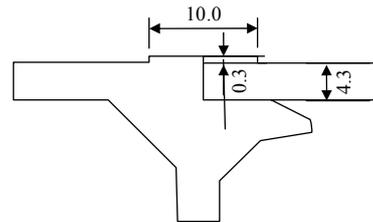


图 1 焊接接头形式

表 2 焊接工艺参数

旋转速率 $\omega / (\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接速度 $v / (\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	$\omega/v$ 比值
1800	800	2.25
2000		2.5
2200		2.75
2400		3.0
2600		3.25
2000	1000	2.0
2200		2.2
2400		2.4
2600		2.6
2800		2.8
2200	1200	1.83
2400		2.0
2600		2.17
2800		2.33
3000		2.5

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 焊缝成形

从图 2 可发现，不同的转速下均能获得较好的焊缝表面成形，焊缝表面能够形成均匀的洋葱环纹，未出现表面沟槽、裂纹等缺陷。飞边主要产生于焊缝的后退侧 (RS)，且随着转速的增加逐渐增加；前进侧 (AS) 几乎无飞边。

飞边形状随着转速不同有所变化。当转速较低时后退侧的飞边呈毛刺状且比较松散，从试件上清理后变为碎铝屑；当转速较高时，后退侧的飞边呈连续条状且比较致密，可直接撕

除，清除后仍为条状，如图 2 (f) 所示。焊接飞边清除后，焊缝成形仍良好。

从图 3 可以发现，当转速较低时焊缝中存在隧道缺陷，主要位于前进侧底部，如图 3 (a) 所示；随着转速增加，缺陷尺寸减小直至消失。

分析认为，当转速较低时，摩擦热不足，导致材料未能得到充分软化，接头部位材料流动性差，因此后退侧回流的金属无法完全填充

搅拌头行走时在前进侧留下的空腔<sup>[7]</sup>，进而导致在前进侧留下隧道缺陷。另一方面，搅拌摩擦焊过程中，前进侧首先受到搅拌针的剪切作用，但初始温度相对较低，导致金属塑性流动不充分<sup>[8]</sup>，而后退侧温度较高，这也导致在前进侧容易产生缺陷。当转速增大后，摩擦热增加，材料得到充分的塑化和流动，因此未出现内部缺陷。

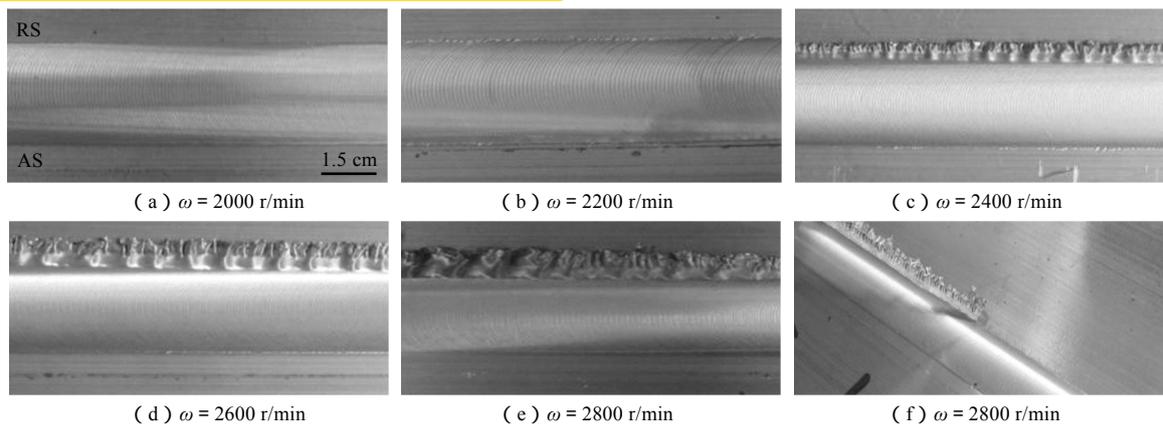


图 2 不同旋转速率下的焊缝表面成形 ( $v = 1000 \text{ mm/min}$ )

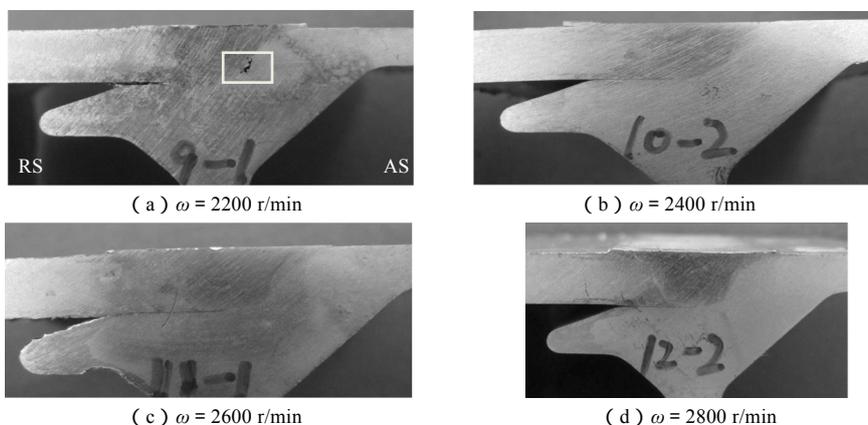


图 3 不同旋转速率下的焊缝宏观断面 ( $v = 1000 \text{ mm/min}$ )

## 2.2 微观组织

图 4 所示为搅拌摩擦焊接头前进侧微观组织。母材组织为由于轧制形成的挤压态的组织如图 4 (a)。焊核区金属由于在搅拌作用下产生强烈的塑性变形且产生大量摩擦热，因此该区域温度较高，发生动态再结晶过程，由挤压态的组织转变为细小的等轴晶，如图 4 (c)。对于热机影响区金属，受到塑性变形以及焊接

热循环的双重作用，一方面靠近焊核区的晶粒产生畸变，被拉长；另一方面由于热循环的作用，其晶粒尺寸大于焊核区。热影响区由于只受到热循环作用，晶粒尺寸增大，如图 4 (d)。

## 2.3 显微硬度

不同搅拌头转速对接头显微硬度的影响如图 5 所示，重点分析了接头（不包括母材）区域显微硬度分布特征。可发现，显微硬度呈“M”

形分布；其中，热机影响区显微硬度最大，焊核区次之，热影响区最小。对可热处理铝合金，显微硬度主要与晶格畸变程度相关，主要影响因素有强化相的固溶量、位错密度等，与晶粒尺寸相关性不大。对焊核区，由于摩擦热的作用，强化相粒子固溶于晶格中形成固溶强化<sup>[9]</sup>；另一方面，由于强烈塑性变形形成的高密度位错等加工硬化效应及固溶导致的晶格畸变在焊核区动态再结晶过程中减弱，使焊核区相比于热机影响区显微硬度有所降低。对热机影响区，受到摩擦热的影响，同样会有部分强化相粒子固溶于晶格中；同时受到塑性变形的影响，在该区域形成大量高密度位错，因此该区域显微硬度略高于焊核区。对热影响区，因受焊接热循环作用，发生过时效现象<sup>[10]</sup>，强化相析出聚集，因此显微硬度值最小，为接头的低硬度区。

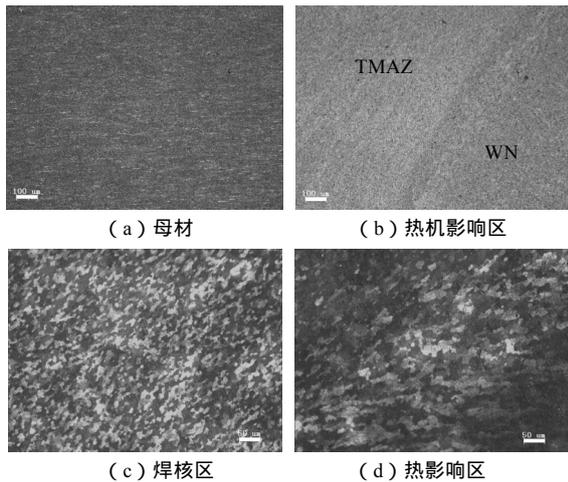


图4 焊缝前进侧微观组织 ( $\omega = 2800 \text{ r/min}$ ,  $v = 1200 \text{ mm/min}$ )

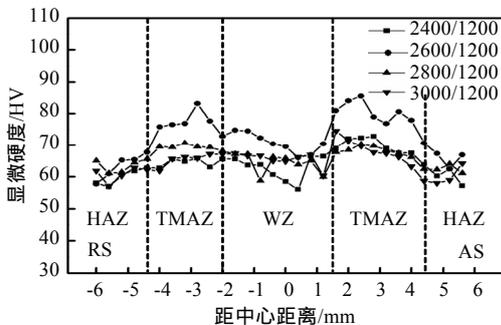


图5 不同转速下接头显微硬度 ( $\omega/v$ )

此外，当焊接速度为 1200 mm/min 时，随

着转速的增加，接头显微硬度呈现先增大、后减小的趋势，在热机影响区表现更加明显。分析原因认为，当转速由 2400 r/min 增加到 2600 r/min 时，焊核区以及热机影响区的固溶强化以及加工硬化作用进一步加强，导致晶格畸变程度增大，因此接头显微硬度增大。当转速进一步增加时，搅拌摩擦产生的热输入也相应增大，过大的热输入导致焊核区和热机影响区开始产生过时效现象，因此显微硬度逐渐降低。

图 6 所示为在相同转速条件下焊接速度对接头显微硬度的影响。可以发现，接头的显微硬度随着焊接速度的提高而增加。

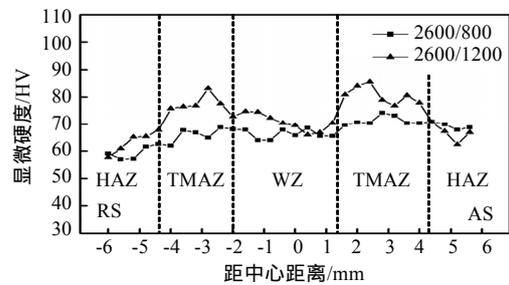


图6 不同焊接速度下接头显微硬度 ( $\omega/v$ )

### 2.4 拉伸性能

选取焊缝成形良好、宏观截面无缺陷的试样进行拉伸试验，结果如图 7 所示。结果表明，转速以及焊接速度对接头力学性能均有影响。

可以发现，当焊接速度为 800 mm/min 和 1000 mm/min 时，随着转速的增加，接头的抗拉强度和屈服强度呈现逐渐增大的趋势，延伸率逐渐减小；当焊接速度为 1200 mm/min 时，随转速增加，力学性能呈现先增大后减小的趋势。这与接头组织密切相关。当转速增加时，接头区塑性变形程度以及摩擦热输入均增大，固溶强化效应以及动态再结晶形成的晶粒细化均不断增强，因此其力学性能提高。当焊接速度为 1200 mm/min、转速大于 2600 r/min 后，继续增大转速，热输入过大，导致焊核区以及热机影响区开始产生过时效现象，一方面强化相粒子析出并聚集长大，强化相应减弱；另一

方面, 过大的热输入导致晶粒尺寸增大, 进而导致力学性能下降。

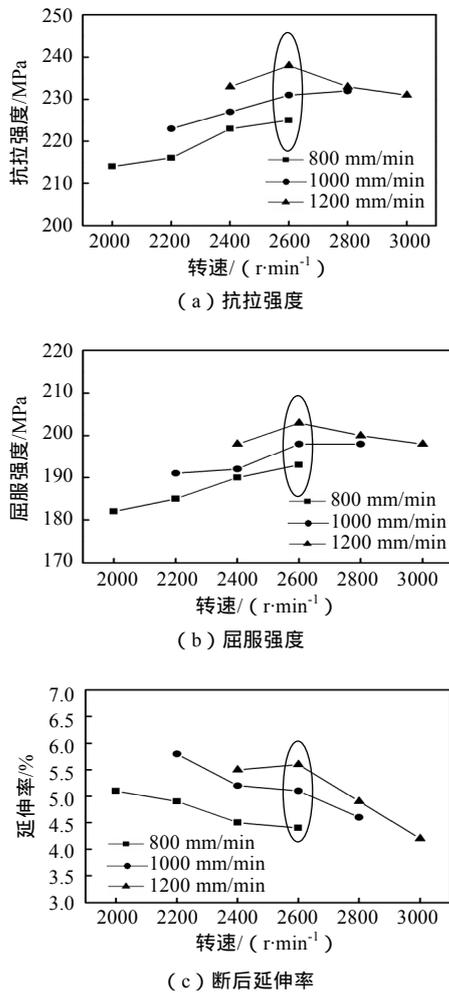


图7 接头力学性能

拉伸试样均断裂于热影响区, 为接头的薄弱区, 这与其受焊接热循环作用导致过时效以及晶粒尺寸增大有关。

此外, 可以发现, 在获得无缺陷接头的前提下, 当搅拌头转速相同时, 随着焊接速度的增大, 接头的力学性能也提高, 如图7中圆圈内所示。当转速为2600 r/min、焊接速度由800 mm/min增大到1200 mm/min时, 抗拉强度由225 MPa增大到238 MPa, 增大了5.8%。

在搅拌摩擦焊过程中, 单位长度焊缝上的热输入量和材料在搅拌头的作用下产生的塑性流变状态是决定焊缝质量的关键因素, 单位长度焊缝上搅拌摩擦焊热输入计算公式为:

$$E = \frac{\pi \omega \mu F (r_0^2 + r_0 r_i + r_i^2)}{45(r_0 + r_i) v} \quad (1)$$

式中:  $E$  为焊接线能量, W/mm;  $r_0$ 、 $r_i$  为搅拌头轴肩的半径和搅拌针的半径, mm;  $F$  为压力, N/mm<sup>2</sup>;  $\mu$  为摩擦系数;  $\omega$  为搅拌头的转速, r/min;  $v$  为搅拌头的焊接速度, mm/min。

由式(1)可知, 当搅拌头结构尺寸一定时, 焊接热输入取决于转速和焊接速度的比值  $\omega/v$ 。因此, 对比了  $\omega/v$  比值相同、转速和焊速不同时的力学性能, 如图8所示。结果表明, 在两种工艺条件下, 其  $\omega/v$  比值均为2.5, 但抗拉强度由224 MPa增大到231 MPa, 增加3.1%左右。分析认为这与转速增大导致的塑性变形程度增加从而加工硬化效应增强有关。

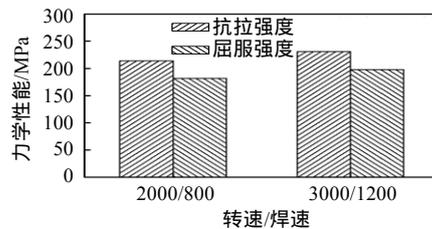


图8 具有相同  $\omega/v$  比值时接头力学性能对比

在本实验条件下, 抗拉强度最大值238 MPa、最小值214 MPa, 分别达到母材的82.1%、73.8%。屈服强度最大最小值203 MPa、182 MPa, 分别达到母材的82.2%、73.7%。转速2600 r/min、焊接速度1200 mm/min时接头的强度值最大。

### 3 结论

(1) 6005A-T6 搅拌摩擦焊接头表面成形良好, 随转速增大, 在后推侧产生飞边, 并由松散的毛刺状转变为致密条带状; 接头内部前进侧底部存在隧道缺陷, 随着转速增大, 缺陷逐渐消失。

(2) 焊接速度及搅拌头转速均会影响接头的显微硬度分布。焊接速度一定(1200 mm/min)时, 随着转速增大, 接头显微硬度先增大后减小; 转速一定时, 随着焊接速度增大, 显微硬

度增大。这与接头区域强化相粒子固溶强化以及塑性变形有关。

(3) 搅拌头转速以及焊接速度对接头力学性能具有明显影响。随着转速增大, 接头强度增大; 转速过大时由于过时效现象强度反而下降。随着焊接速度增大, 接头强度也相应增大。在相同热输入条件下, 具有较大转速和焊速的工艺接头性能更好。

参考文献:

[1]刘静安. 轨道车辆用大型铝合金型材的开发评估及挤压工艺特点[J]. 四川有色金属, 2001 ( 1 ) : 4-14.

[2]R.S. Mishra, Z.Y. Ma. Friction stir welding and processing [J]. Materials Science and Engineering R, 2005, 50 ( 1-2 ) 1-78.

[3]R. Nandan, T. Debroy, H.K.D.H. Bhadeshia. Recent advances in friction-stir welding-Process, weldment structure and properties [J].

Progress in Materials Science, 2008, 53 ( 6 ) : 980-1023.

[4]GB/T 26955-2011. 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验[S].

[5]GB/T 2651 - 2008, 焊接接头拉伸试验方法[S].

[6]GB/T 27552 - 2011, 金属材料焊缝破坏性试验 焊接接头显微硬度试验[S].

[7]王磊, 谢里阳, 李兵. 铝合金搅拌摩擦焊过程缺陷分析[J]. 机械制造, 2008, 46 ( 2 ) : 5-9.

[8]宫文彪, 田红娇, 刘威, 等. 6082-T6 铝合金厚板搅拌摩擦焊沿厚板方向性能变化[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41 ( S2 ) : 854-857.

[9]杨文超, 汪明朴, 盛晓菲, 等. 轨道交通车辆用 6005A 合金板材时效析出及硬化行为研究[J]. 金属学报, 2010, 46( 12 ) :1481-1487.

[10]W.B. Lee, Y.M. Yeon, S.B. Jung. Evaluation of the microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6005 aluminum alloy[J]. Materials Science and Technology, 2003, 19 ( 11 ) : 1513-1518.

(上接第 62 页)对材料的抗拉强度产生了一定的影响。从成分分析其原因应是由于 2#试件焊缝和母材中所含微量元素的差异所致。从母材合金所含元素可以发现, M2#试样的 Mn、Cr 含量远远低于其他三组。而 Mn 能阻碍铝合金的再结晶过程, 并能显著细化再结晶晶粒。Mn 还能溶解杂质铁 ( Fe ), 减小铁有害影响。Cr 在铝合金中能形成(Cr,Fe)Al<sub>7</sub> 和(Cr,Mn)Al<sub>12</sub> 等金属间化合物, 阻碍再结晶的形核和长大过程, 对合金有一定的强化作用。而且 H2#试样中 Zn 和 Ti 含量也较少。导致 Mg - Zn<sub>2</sub>形成的强化效果不是很明显, Ti 含量较少导致 TiAl<sub>2</sub> 相比较少, 结晶时的非自发核心较少, 细化组织效果不明显。

上述种种原因综合起来造成 M2#母材的抗拉强度较低。但是, 对其进行焊接后, 由于焊丝中 Mg 元素的融入, 使焊缝的抗拉强度有所提高。最终导致焊缝金属还在变形阶段而熔合线处却已经发生断裂。H3#试样由于 Mg、Zn、

Mn、Cr、Ti 含量都比较多, 所以抗拉强度最高。

3 结论

(1) 由于焊接实验在 10%、-70%湿度条件下进行, 故焊接接头气孔含量比常规焊接条件下焊接接头气孔含量多。气孔的存在对材料的各种力学性能都产生了一定的影响。

(2) 通过硬度及拉伸试验发现, 合金元素 Mg、Zn、Mn、Cr、Ti 在提高铝合金抗拉强度方面有很大作用。

参考文献:

[1]Gou G., Zhang M., Chen H., Chen J., Li P., Yang, Y. P. Effect of humidity on porosity, microstructure, and fatigue strength of A7N01S-T5 aluminum alloy welded joints in high-speed trains. Materials & Design, 2015 ( 85 ) : 309-317.

[2]GB/T 2651 - 2008, 焊接接头拉伸试验方法[S].

[3]GB/T 229 - 2007, 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法[S].