

Effect of Line Energy on the Microstructure and Property of A7N01 Aluminum Alloy Joint

Hui Zhou¹, Tao Li¹, Chuanping Ma², Zhenghong Fu²

¹CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

²College of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Email: 285658885@qq.com, 458564006@qq.com, swjtumcp2010@163.com, 956918757@qq.com

Received: Mar. 8th, 2017; accepted: Mar. 27th, 2017; published: Mar. 31st, 2017

Abstract

The microstructure and properties of A7N01-T5 alloy double pulse MIG (Metal Inert-gas) welding butt joint under different line energy were compared. Results were shown below: A beautiful weld surface topography could be got under moderate line energy; with the line energy increase, more second phases separate out in the joint and the dendrites also increase, and the grain growth of the HAZ was also promoted; while under low line energy condition, better comprehensive mechanical properties could be got.

Keywords

A7N01-T5 Aluminum Alloy, Double Pulse MIG Welding, Joint Microstructure, Mechanical Property

线能量对A7N01铝合金焊接接头组织及性能的影响

周 辉¹, 李 涛¹, 马传平², 付正鸿²

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛

²西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都

Email: 285658885@qq.com, 458564006@qq.com, swjtumcp2010@163.com, 956918757@qq.com

收稿日期: 2017年3月8日; 录用日期: 2017年3月27日; 发布日期: 2017年3月31日

摘 要

通过对A7N01S-T5铝合金不同线能量条件下双脉冲MIG焊(熔化极惰性气体保护焊)对接接头组织和力学

性能的比较, 得到以下结论: 适中的线能量可以得到较为美观的焊缝表面成型; 线能量的增大, 促进了焊缝内第二相的析出, 树枝晶也随之增多, 同时也促进了热影响区晶粒的长大; 而在较低的线能量条件下得到了相对较好的综合力学性能。

关键词

A7N01S-T5 铝合金, 双脉冲MIG焊, 接头组织, 力学性能

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

为适应高速列车轻量化要求, 车体大部分采用铝合金材料制造。A7N01 铝合金主要用于高速列车的枕梁、牵引梁等部件[1]。A7N01 铝合金 Al-Zn-Mg 系铝合金, 最早由日本开发, 具有良好的挤压成型性能和焊接性能, 是理想的中高强度焊接结构材料[2]。我国的轨道列车铝合金车体生产过程中, 最常用的焊接方法是 MIG 焊, 多采用机械手操作的自动焊或手工操作的半自动焊, 具有焊接接头质量优良、较广的适应范围、较高的焊接效率和很好的经济效益等一系列优点[3]。焊接工艺参数中, 焊接电压、焊接电流、焊接速度、线能量等是影响焊接接头成型和质量的关键参数, 尤其是焊接线能量对焊接接头的组织和性能影响很大。

双脉冲 MIG 焊接由于其熔滴过渡形态的可控性和间歇性, 可以精确控制焊接过程中的热输入量, 因而广泛应用于窄间隙、全位置、薄板等特殊焊接。张志毅等[4]研究了单、双脉冲 MIG 焊接方法对 A5083 铝合金板材对接接头疲劳寿命的影响。高宝杰[5]、夏宁[6]对 7N01S-T5 铝合金单脉冲 MIG 焊、双脉冲 MIG 焊及超微弧焊三种焊接工艺条件下对接接头组织及力学性能进行了比较。梁志敏等[7]对 7N01P-T4 板材脉冲 MIG 焊对接接头的组织及力学性能进行了分析。而以上研究均未具体分析到焊接参数对接头组织与性能的影响。

本文以 A7N01S-T5 铝合金为对象, 研究了双脉冲 MIG 焊中焊接线能量对其焊接接头组织及力学性能的影响。

2. 材料及试验方法

焊接母材为 A7N01S-T5 型材, 焊丝采用 ER5356 铝镁焊丝, 焊丝直径为 1.6 mm。母材及焊丝主要化学成分如表 1 所示。焊接母材试板尺寸为 400 × 150 × 8 mm。

焊接方式采用双脉冲 MIG 焊, MIG 焊机型号为 Kemp Arc-450, 机械臂为 ABB 公司的 IRB2600 机器人。在焊前进行点焊, 整个焊缝由打底焊和盖面焊两层焊道组成。接头坡口角度为 70°V 型坡口, 顿边 1 mm, 焊接间隙 1.2 mm。决定焊接线能量的主要参数就是焊接速度, 焊接电流和电弧电压, 其关系表达式为:

$$Q = I \cdot U / v \quad (1)$$

其中 q 为焊接线能量, I 为焊接电流, U 为焊接电压, v 为焊接速度。焊接过程中, 通过利用焊接机器人自动焊接, 调整焊接速度和送丝速度来调整焊接电流和焊接电压, 从而改变焊接线能量的大小。具体焊接参数如表 2 所示。

Table 1. Chemical composition of base material and welding wire (wt%)**表 1.** 焊接母材及焊丝主要化学成分(wt%)

元素	Si	Mg	Cu	Mn	Ti	Cr	Zn	Fe	Al
A7N01	≤0.30	1.00~2.00	≤0.20	0.20~0.70	<0.20	≤0.30	4.00~5.00	≤0.35	余量
ER5356	≤0.25	4.50~5.50	≤0.10	0.05~0.20	0.06~0.2	0.05~0.20	≤0.10	≤0.40	余量

Table 2. Welding parameters**表 2.** 焊接试验参数

试板编号	位置	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/(m/min)	送丝速度/(m/min)	线能量/(J/mm)
a	打底	186	21.8	0.6	7.2	405.48
	盖面	176	22.3	0.48	7.0	436.09
b	打底	225	20.2	0.6	8.0	454.50
	盖面	224	20.4	0.54	8.0	507.73
c	打底	222	21.5	0.6	8.0	477.30
	盖面	212	22.7	0.48	8.0	600.49

试板焊接完成后, 观察焊缝表面成型情况, 并进行 X 射线无损探伤。对焊接合格试板截取接头金相试样, 经过打磨抛光后采用 Keler 试剂腐蚀, 在 AX10 蔡司金相显微镜上对接头金相组织进行观察。分别按照 GB/T 2635-2008、GB/T228.1-2010 切取弯曲和拉升试样, 试样均以焊缝为中心, 分别进行弯曲和拉升试验。按照 GB/T 229-2007 切取 V 口冲击试样, 开口位置分别在焊缝、靠近熔合线的热影响区和母材。

3. 实验结果与分析

3.1. X 射线探伤结果及分析

不同线能量条件下焊缝表面成型质量如图 1 所示。三种线能量条件下焊缝表面未观察到咬边、未焊透以及未熔合等缺陷, 符合基本成型的要求。当焊接线能量较低时, 焊缝表面鱼鳞纹虽较好, 但是存在较大颗粒飞溅; 而线能量较高时, 表面则无明显鱼鳞纹且存在少量飞溅; 当线能量适中时, 焊缝表面鱼鳞纹美观, 且无飞溅。焊缝表面产生这种差别的原因主要在于适中的线能量, 既避免了较低的热输入带来的母材未充分熔化问题, 也避免了大的线能量导致热输入过大, 焊缝不能得到充分搅拌的问题, 因而在适中的线能量下得到了较好的焊缝表面成型质量。

焊缝 X 射线无损探伤结果如图 2 所示。三种线能量下的焊缝均不存在未焊透以及大气孔等明显的缺陷; 底片中存在一条黑色细线, 它由焊缝背面突出, 过渡曲面以及材料突变所致, 随着线能量的增大, 细线颜色变浅, 因为线能量的增大, 增加了焊丝熔化过程的稳定性, 焊丝与母材之间相互扩散充分; 在较大的线能量条件下, 焊缝中出现了一些微小的气孔。这是由于在平衡条件下, 氢在铝合金中的溶解度在凝固点时从 0.69 ml/100 g 下降到 0.036 ml/100 g, 因此, 焊接冷却凝固时, 焊缝组织中形成的气泡无法及时逸出, 导致气孔的形成。随着焊接线能量增加, 氢在铝中溶解度增加, 进入到焊接熔池中氢也就增加, 从而凝固后形成的气孔越多[8]。为了避免焊接过程中气孔的形成, 焊接前很有必要对焊件表面进行清理。

3.2. 接头组织分析

接头经打磨抛光后, 采用 Keler 腐蚀液腐蚀, 三种线能量条件下焊缝的金相组织如图 3 所示。焊缝呈明显的铸态, 随着线能量的增大, 逐步出现粗大的树枝晶; 树枝晶周围分布有较多的第二相, 随着线

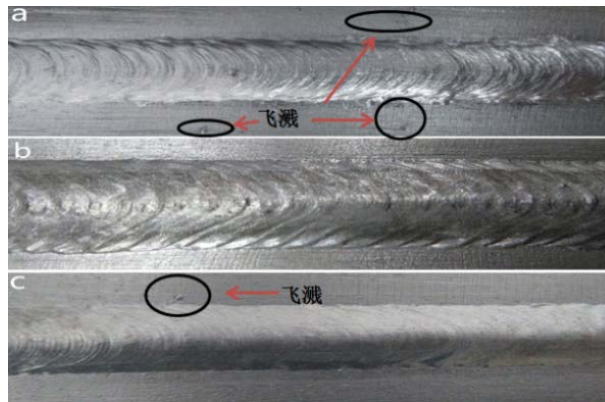


Figure 1. Joint surface forming morphology
图 1. 焊缝表面成型形貌

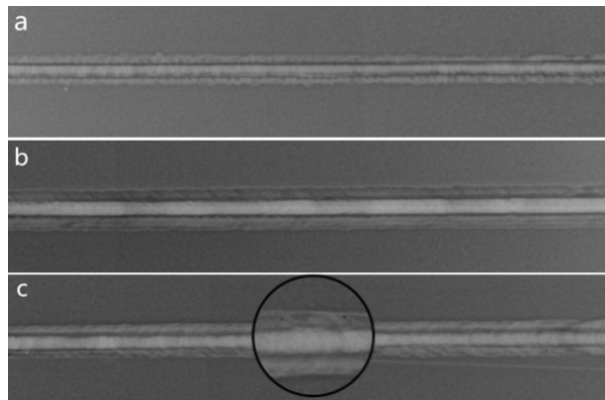


Figure 2. Negative of X-Ray radiographic inspection
图 2. X 射线探伤底片

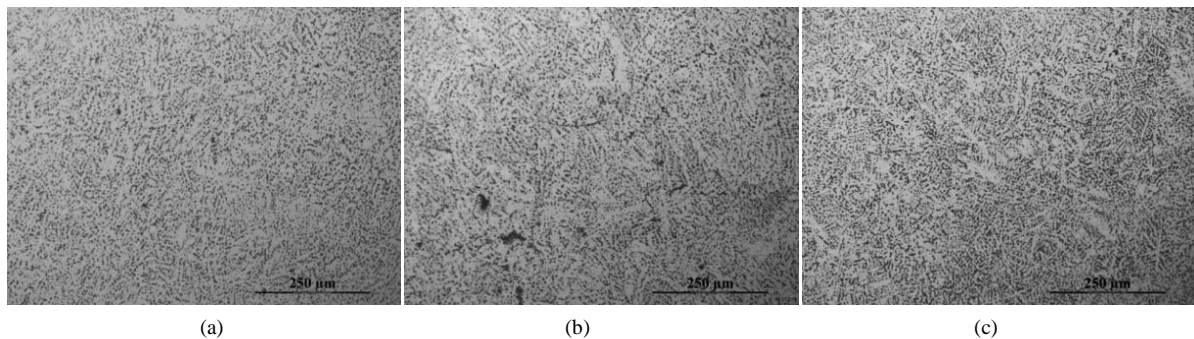


Figure 3. Weld joint microstructure in different line energy
图 3. 不同线能量条件下焊缝金相组织

能量的增大，第二相析出更多，且更加趋向于在树枝间分布，在视场内留下更多的白色区域。不同线能量条件下热影响区的金相组织如图 4 所示。热影响区还保留着部分轧制态形貌，随着线能量的增加，晶粒尺寸也逐步变大，第二相分布也愈发聚集粗大。高的线能量条件下，由于受到焊接热循环的作用，熔池温度较高，焊缝熔池在高温液态停留时间变长，促进更多热量向母材传递，凝固冷却速度相对较慢，较高的能量为晶界的迁移提供更多的驱动力，使得热影响区中的第二相能够充分析出聚集，晶粒也具有足够的驱动力长大[9]。第二相的聚集长大和晶粒的粗化会降低接头的力学性能。

3.3. 拉伸试验结果与分析

拉伸试验采用矩形截面试样，拉伸试验结果如表 3 所示。随着线能量的增大，接头抗拉强度和断面收缩率均逐步降低，而断后延伸率则接近。三种线能量条件下的接头平均抗拉强度值均达到了 DINEN288-4 标准规定的 240 MPa，满足高速列车对铝合金拉伸强度要求。随着线能量的增加，焊缝区域树枝晶逐步粗大，热影响区晶粒尺寸也逐步长大粗化，根据 Hall-Petch 公式，二者均会引起接头强度的降低，从而降低了材料的力学性能。

3.4. 弯曲试验结果与分析

对接头进行焊缝正弯试验的结果如表 4 所示，整体来看，在所选的线能量范围内其值对焊接接头的弯曲性能影响不大，焊缝均能够良好的适应弯曲，不会因为焊缝弯曲而断裂，这也证实了在该线能量范围内焊缝中不存在对弯曲性能影响较大的大气孔、夹渣、未焊透及未熔合等焊接缺陷。

3.5. 冲击试验结果与分析

三种线能量条件下焊缝(W)、母材(BM)和热影响区(HAZ)三个区域的冲击吸收功如图 5 所示。热影响区具有相对较高的冲击功，且高线能量条件下表现出更高的冲击功。焊缝由于所用焊丝为铝镁焊丝，本身强度较低，同时焊缝中存在一些尺寸较小的气孔缺陷(见 3.1)，从而使得焊缝的冲击性能相对于热影响区和母材来讲要低。三种线能量条件下的母材的冲击功相差不大，这是因为母材区域远离焊缝区域，所

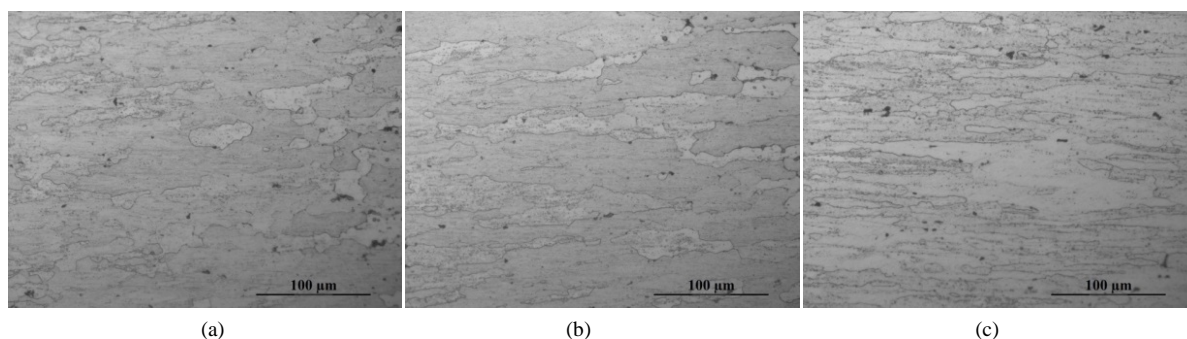


Figure 4. HAZ microstructure in different line energy

图 4. 不同线能量条件下热影响区金相组织

Table 3. Tensile test result

表 3. 拉伸试验结果

试板编号	抗拉强度平均值/MPa	断面收缩率/%	断后延伸率/%	断裂位置
a	294	30.51	4.36	焊缝
b	277	25.32	4.67	焊缝
c	275	21.82	4.75	焊缝

Table 4. Bending test result

表 4. 弯曲试验结果

试板	弯曲形式	是否断裂	弯曲性能
a	正弯	否	良好
b	正弯	否	良好
c	正弯	否	良好

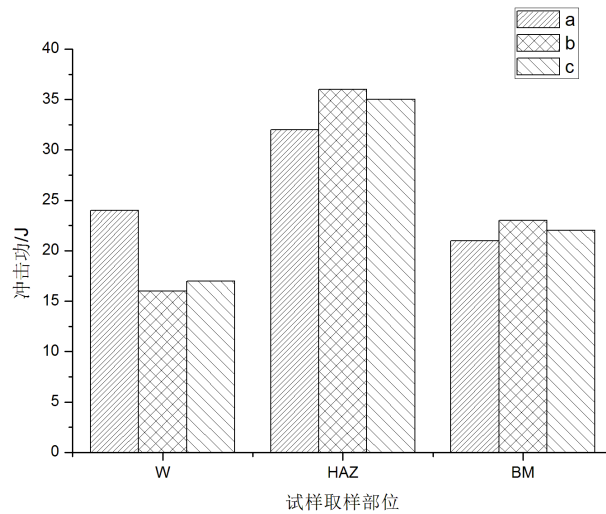


Figure 5. Comparison of impact absorbing energy between different line energy

图 5. 不同线能量条件下接头冲击吸收功比较

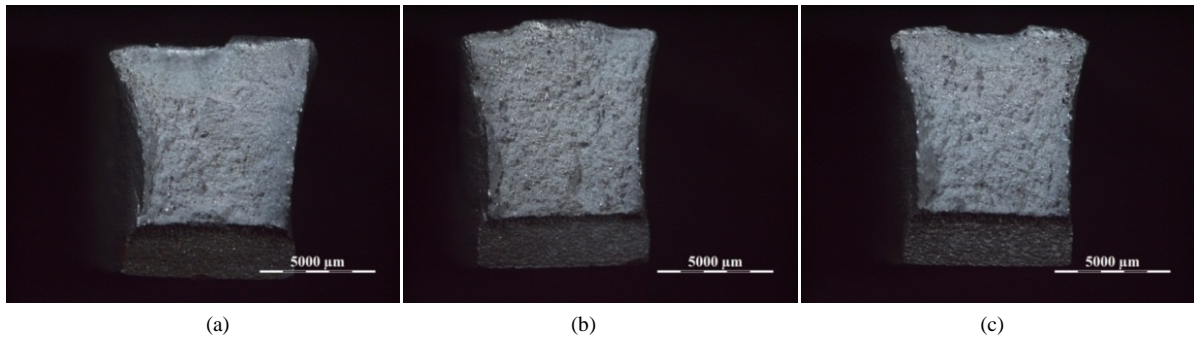


Figure 6. Impact fracture macroscopic morphology of weld joint. (a) Test sample a; (b) test sample b; (c) test sample c

图 6. 焊缝冲击断口宏观形貌。(a) 试样 a; (b) 试样 b; (c) 试样 c

受到焊接热的影响较小，所以线能量的高低对该区域的冲击功影响不大。热影响区的冲击功在同一个接头的三个区域中是最高的，这是因为热影响区靠近焊缝熔池，焊接过程中要经历较高温度的热循环作用，实际上起到了一个时效处理的作用，离熔合线近的区域为固溶区，固溶区紧邻的就是过时效软化区[10]。过时效软化区的存在降低了接头的强度，但却改善了接头的韧性，使得热影响区的冲击功要大于原始母材。

不同线能量条件下焊缝的冲击断口宏观形貌如图 6 所示。随着线能量的增大，断口逐渐变得平整，断口表面结晶状形貌增多；断口边沿具有明显的剪切唇形貌，且在低线能量条件下，剪切唇更长，断口周围的塑性变形也更为严重，这说明线能量低的焊缝的冲击韧性较好。这是因为从宏观断口中可以发现线能量越高，焊缝中存在的气孔缺陷越多，气孔缺陷的存在，降低了焊缝的冲击韧性；同时结合金相分析结果，可知焊缝区域为铸态枝晶，在较低的线能量条件下，树枝晶相对较为细小，第二相的分布也相对均匀，因而焊缝具有良好的强度和塑性，在冲击试验中表现出较高的冲击功。

4. 结论

(1) A7N01-T5 铝合金焊接接头的焊缝外观成形随着线能量的变化而变化，线能量低时，鱼鳞纹明显，但颗粒状飞溅较多；而线能量大时，虽只有少量飞溅，但无明显鱼鳞纹。

(2) 随着线能量的增大, A7N01S-T5 铝合金焊接接头拉伸强度减小, 断后伸长率增大。线能量最低时, 焊缝的冲击功最大; 热影响区的冲击功先增大后减小。三种线能量条件下母材的冲击功基本不变。焊接接头均具有良好的弯曲性能。

参考文献 (References)

- [1] 王元良, 陈辉. 高速列车铝合金焊接的发展趋势[J]. 电焊机, 2010, 40(10): 9-16.
- [2] 王元良, 陈辉. 高速列车铝合金车体的焊接技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2012, 12-25.
- [3] 王元良, 骆德阳, 王一戎. 我国高速列车焊接技术及其新发展[J]. 电焊机, 2008(38): 8-13.
- [4] 张志毅, 王勇, 齐维闯, 等. 不同焊接工艺条件对 A5083 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 电焊机, 2015, 45(12): 88-92.
- [5] 高宝杰, 吉华, 潘云杰, 等. 脉冲 MIG 焊对 7N01 铝合金焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 48(15): 138-140.
- [6] 夏宁, 金文涛, 杜刚, 等. 不同 MIG 焊方法对 7N01-T4 铝合金焊接接头力学性能的影响[J]. 电焊机, 2014, 44(2): 74-77.
- [7] 梁志敏, 李亚博, 汪殿龙, 等. 7N01 铝合金脉冲 MIG 焊焊接接头组织与力学性能分析[J]. 电焊机, 2015, 45(2): 35-38.
- [8] 张燕, 杨涛涛. 焊接线能量对汽车用镁-铝 MIG 焊接接头组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(9): 243-244.
- [9] 彭东. 焊接参数及结构对 6061 铝合金 TIG 及 FSSW 接头组织与力学性能影响[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学材料科学与工程学院, 2013.
- [10] 章淑芳. A7N01 铝合金焊接热模拟及微区腐蚀性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学材料科学与工程学院, 2016.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: met@hanspub.org