

Effect of Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joint of A7N01P-T4 Alloy by Grinding Size

HuaiPu Ge¹, Zhonghuang Yun¹, Zhongchen Dai¹, Ningning Fu¹, Ning Xia¹, Jingnan Sun¹, Guoqing Gou², Chao Qin²

¹CRRR Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

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

Email: 13655167051@126.com

Received: Jun. 3rd, 2017; accepted: Jun. 18th, 2017; published: Jun. 22nd, 2017

Abstract

Aluminum has a low density, high strength, good extrusion performance, good weldability and excellent processing performance and other characteristics, which has become the dominant vehicle production materials of high-speed trains. In the aluminum car body production process, welding technology is the most widely used production and processing method. After the completion of high-speed train's aluminum body welding, Weld will be a certain reinforcement. Weld reinforcement will not only affect the overall structure of the dimensional accuracy, but also affect the safety and reliability of high-speed trains, so in order to meet the actual requirements, most of the welded joints require more than a high polish. Thus, research on weld reinforcement grinding process is very necessary. This article studied on the effect of different polished size on the fatigue properties of A7N01P-T4 aluminum butt joints. The results showed that different size polished aluminum butt joints tensile strength has little difference on elongation. Effects of different grinding size on the polished aluminum butt joints fatigue properties change greatly. Fatigue crack initiation in weld defects was more common in the pores, slag and hard phase. Thus the main reason that affecting the fatigue performance of welded joints is the welding quality.

Keywords

A7N01P-T4 Aluminum, Welded Joints, Grinding Size, Mechanical Properties, Fatigue Properties

打磨粒度对A7N01P-T4铝合金焊接接头组织及力学性能的影响

葛怀普¹, 云中煌¹, 戴忠晨¹, 付宁宁¹, 夏宁¹, 孙景南¹, 苟国庆², 覃超²

文章引用: 葛怀普, 云中煌, 戴忠晨, 付宁宁, 夏宁, 孙景南, 苟国庆, 覃超. 打磨粒度对 A7N01P-T4 铝合金焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 机械工程与技术, 2017, 6(2): 159-168. <https://doi.org/10.12677/met.2017.62022>

¹中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京

²西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都

Email: 13655167051@126.com

收稿日期: 2017年6月3日; 录用日期: 2017年6月18日; 发布日期: 2017年6月22日

摘要

铝合金具有密度低、强度高、挤压性能好、焊接性优良及加工性能好等特点, 已经成为高速列车车体生产的主导材料。在铝合金车体生产过程中, 焊接技术是使用最为广泛的生产加工方式。高速列车铝合金车体焊接完成后, 焊缝部位会形成一定的余高。余高不但影响高速列车整体结构尺寸精度, 还会影响高速列车的安全可靠性, 因此为了满足实际使用要求, 大部分焊接接头均要求打磨余高。因而焊缝余高打磨工艺的研究是相当必要的。本文研究了不同打磨粒度对A7N01P-T4铝合金对接接头疲劳性能的影响。结果表明不同打磨粒度铝合金对接接头抗拉强度, 延伸率差别不大。不同打磨粒度对铝合金对接接头疲劳性能的影响多变的。疲劳裂纹源均萌生于焊缝缺陷, 多见于气孔, 夹渣与硬质相, 因而焊接接头的质量对疲劳性能的影响占主要原因。

关键词

A7N01P-T4铝合金, 焊接接头, 打磨粒度, 力学性能, 疲劳性能

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

7N01 铝合金为 Al-Zn-Mg 可热处理强化型高强铝合金, 具有优良的焊接性能、挤压性能等综合性能。因此, 7N01 铝合金被广泛应用于高速列车生产制造中以满足高速列车轻量化和高速的要求[1] [2] [3]。铝合金车体主要采用焊接的加工工艺制造, 焊接完成后, 焊接接头表面会形成一定的余高, 而焊后焊缝余高的存在将影响铝合金焊接接头的使用性能[4] [5]。铝合金焊缝打磨主要针对焊缝余高和焊缝接头的打磨, 利用良好的打磨工艺除去余高以及焊接残留物, 使焊缝具有良好的表面光滑度且具有金属光泽。目前铝合金焊接工艺方面法国、德国、日本等国都做了许多研究。而焊后打磨工艺研究正处于起步阶段, 相关方面需要更加深入的研究。

本文针对不同打磨粒度(40 目, 80 目和 120 目)打磨后的焊接接头进行金相组织观察、硬度试验、拉伸试验和疲劳试验, 对打磨粒度对焊接接头疲劳性能的影响进行研究。

2. 试验材料及方法

2.1. 试验材料

本试验采用 12 mm 厚 A7N01P-T4 (淬火 + 自然时效)铝合金板材进行焊接, 试验用板材均满足 JIS H4100 相关要求。焊接材料选用直径 1.2 mm 的 ER5356 铝镁合金焊丝。7N01 铝合金和 ER5356 焊丝的化学成分如表 1 所示。

2.2. 试验方法

铝合金试板采用半自动 MIG 焊进行焊接, 坡口形式为双面 V 形对接坡口(如图 1), 焊接参数如表 2 所示。焊后依次对试板进行渗透探伤和射线探伤。渗透探伤试验方法按 EN 571-1:1997《无损检验·渗透检验·第 1 部分:通用原理》进行, 焊接缺欠等级按 ISO 10042-B 执行; 射线探伤按 ISO17636: 2003《焊缝的无损检测-熔化焊接头的射线检测》进行, 焊接缺欠等级按 ISO 10042-B 执行。焊接试板起弧与收弧处 25 mm 内的缺陷不计入。探伤后对符合要求的试板分别用 40、80、120 三种不同粒度砂轮进行焊缝余高打磨。打磨方向与焊缝方向平行, 打磨后的纹路与焊缝垂直。打磨后的焊缝与母材等高。

2.3. 测试方法

打磨完成后对焊接接头分别进行显微组织观察, 硬度、拉伸和疲劳试验。显微组织观察参照 GBT 3246.2-2000 变形铝及铝合金制品组织检验方法进行。硬度试验根据标准 GB/T2654-2008/ISO9015: 1-2000 及 HB5173-96, 采用 HV-30 数显维氏硬度计进行试验, 载荷 3 KN, 加载时间 10 S。拉伸试验根据 GB/T228-2010 标准, 在 CMT5305 电子万能试验机上进行试验, 试验速度 5 mm/min。疲劳试验使用 GPS200 高频疲劳试验机进行, 应力比 $R = 0$, 加载频率为 85~140 Hz。

Table 1. Main chemical compositions of A7N01P-T4 alloy and solder wire ER5356

表 1. A7N01P-T4 铝合金及 ER5356 焊丝主要化学成分(wt%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
7N01	0.30	1 - 2	≤0.20	0.2 - 0.7	<0.4	<0.3	4 - 5	≤0.15	余量
ER5356	0.25	4.5 - 5.5	<0.1	0.05 - 0.2	<0.1	0.05 - 0.2	0.1	<0.15	余量

Table 2. Welding parameters

表 2. 焊接工艺参数

焊道	方法	填充金属直径(mm)	电流(A)	电压(V)	电流种类和极性	焊接速度(mm/s)	线能量(KJ/mm)
1	131	1.2	222	24.3	DCEP/+	8.7	0.50
2	131	1.2	232	25.2	DCEP/+	6.4	0.73
3	131	1.2	196	24.2	DCEP/+	5.4	0.70

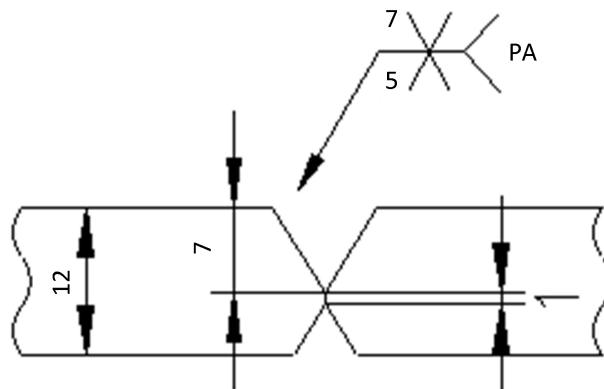


Figure 1. Diagram of welding groove of butt joint

图 1. 对接接头焊接坡口示意图

3. 试验结果与讨论

3.1. 显微组织分析

图 2(a)为焊缝区显微组织,主要为 α -Al 基体和其上分布着的部分析出的 β (MgZn_2), 焊缝晶粒形态多为等轴树枝晶, 图 2(b)为熔合区显微组织, 左侧为焊缝, 右侧为热影响区, 在靠熔合线的焊缝一边, 晶粒沿散热方向呈十分明显的柱状晶, 在熔合线处柱状晶较为粗大, 这是因为铝合金焊接过程中, 由于铝的热导率很大且结晶温度区间较宽, 热量很快就传导开, 使得热影响区晶粒生长过程中产生很大的过冷度, 导致柱状晶组织的出现, 过冷度越大, 柱状晶越粗大, 图 2(c)为热影响区显微组织, 可以看出热影响区组织与母材相似但由于热影响区靠近焊缝, 受到焊接热循环的影响比母材大, 温度高且冷却速度快, 导致晶粒比母材处粗大, 且析出相也比母材要多, 图 2(d)为 A7N01P-T4 铝合金焊接接头母材的显微组织, 沿轧制方向延长呈纤维状的晶粒在 α -Al 基体上分布着时效过程中析出的 MgZn_2 强化相。

3.2. 焊接接头硬度分布

图 3 为 7N01 铝合金对接接头硬度曲线。焊接接头显微硬度的变化表明焊接热循环作用下, 焊接接头组织发生了复杂的相和组织变化。焊缝中心的硬度最低, 约在 80 HV 左右, 在距离焊缝中心 6~10 mm

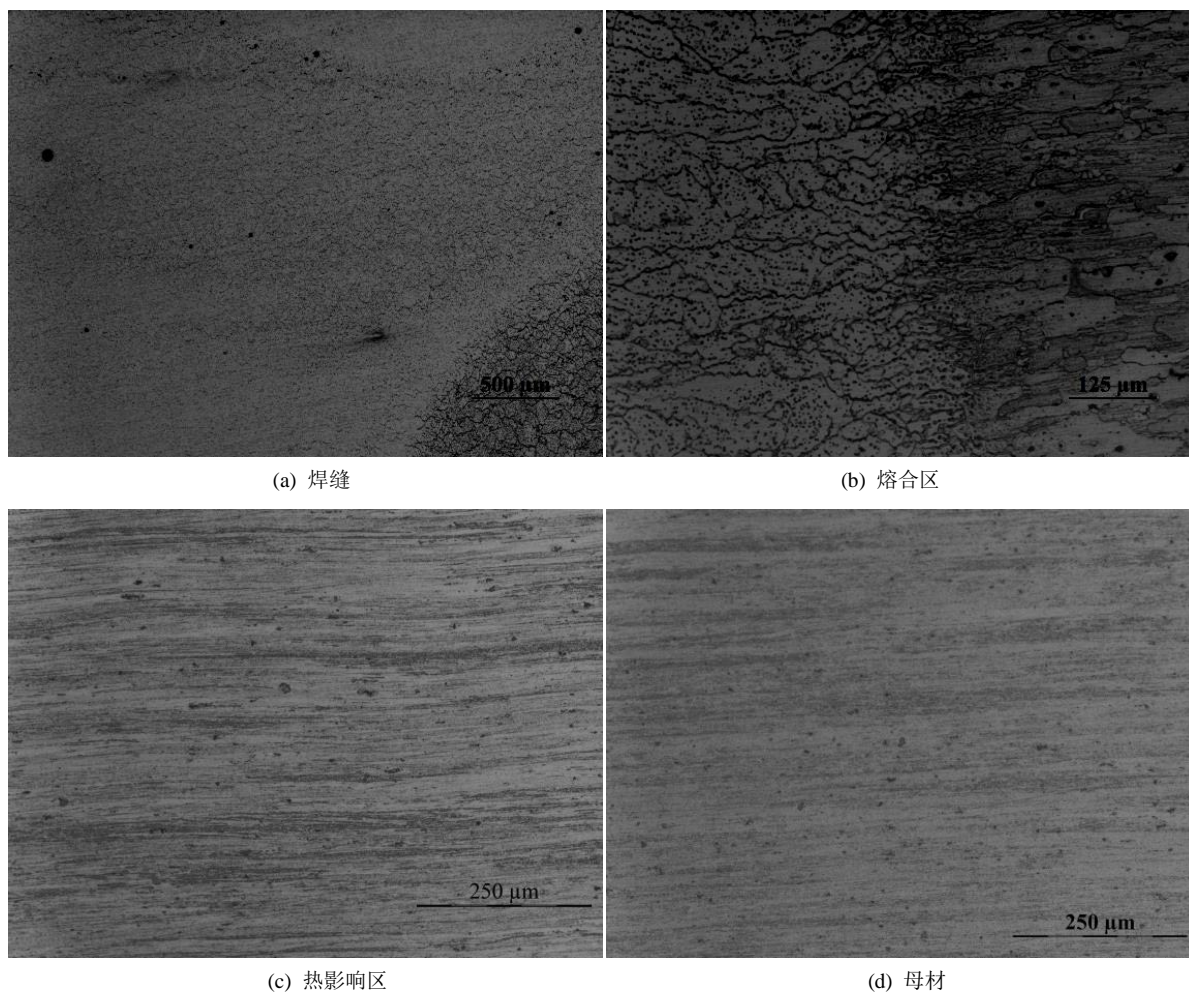


Figure 2. Microstructure of A7N01P-T4 aluminum alloy butt joint

图 2. A7N01P-T4 铝合金对接接头显微组织

左右为淬火区，硬度约为 145 HV，在距离焊缝中心 ± 15 mm 为软化区，在此区域硬度值显著下降，为热影响区硬度的最低点，约为 110 HV。软化区由于焊接热循环温度过高使其组织发生再结晶而发生软化；在距离焊缝中心 22 mm 左右为母材，此区域硬度最高，为 155 HV。对比三条曲线，可以发现打磨粒度对 A7N01P-T4 铝合金焊接接头硬度影响并不明显。

3.3. 拉伸试验结果及分析

从表 3 可看出，A7N01P-T4 铝合金对接接头拉伸断裂位置都在焊缝，这与硬度试验得到的结论一致，说明焊缝是整个接头最薄弱的环节。其中试样 7-40、7-80 的抗拉强度相同，为 303 MPa，试样 7-120 抗拉强度略有下降为 288 MPa；经过打磨的焊接接头屈服强度和抗拉强度具有相同的规律，在打磨粒度为 80 目时取得最优的屈服强度为 276 MPa，在打磨粒度为 120 目时，屈服强度最低，为 257 MPa。焊接接头的延伸率亦在打磨粒度为 80 目时取得最大，在打磨粒度为 40 目时最小。

3.4. 疲劳试验结果及分析

通过表 4 和图 4 为经过不同粒度打磨后焊接接头疲劳试验结果和 S-N 曲线，可以看出 7-40 和 7-120

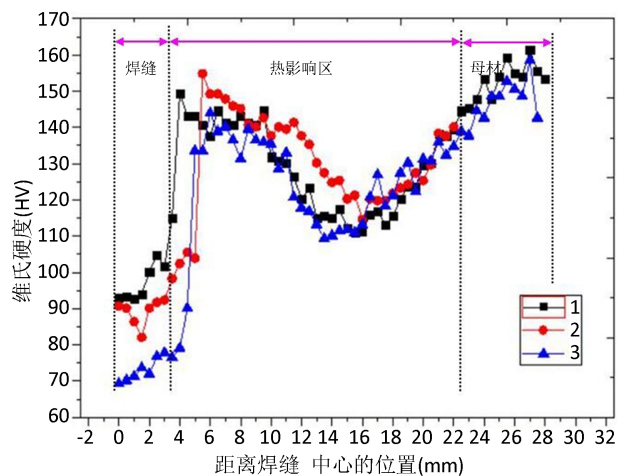


Figure 3. Hardness curve of A7N01P-T4 aluminum alloy butt joint
图 3. A7N01P-T4 铝合金对接接头硬度值曲线

Table 3. Tensile test data of A7N01P-T4 aluminum alloy butt joint

表 3. A7N01P-T4 铝合金对接接头拉伸试验数据

试样编号	抗拉强度/MPa	均值/MPa	屈服强度/MPa	均值/MPa	延伸率/%	平均值/%	断裂位置
7-40-1	308.29		269		2.8		焊缝
7-40-2	298.05	303	268	266	2.75	2.68	焊缝
7-40-3	303.86		262		2.51		焊缝
7-80-1	282.4		280		3.15		焊缝
7-80-2	313.32	303	274	276	4	3.52	焊缝
7-80-3	313.97		276		3.41		焊缝
7-120-1	282.12		248		3.25		焊缝
7-120-2	288.29	288	260	257	3.52	3.36	焊缝
7-120-3	296.12		263		3.31		焊缝

Table 4. Fatigue data of A7N01P-T4 aluminum alloy butt joint
表 4. A7N01P-T4 铝合金对接接头疲劳数据

材料	板厚/mm	接头形式	打磨粒度/目	试件编号	载荷/MPa	循环周次	断裂位置
7N01-T4	12	对接	40	1	120	663900	焊缝
				2	110	1000000	未断
				3	100	1000000	未断
			80	1	120	677500	焊缝
				2	110	1324040	焊缝
				3	100	1000000	未断
			120	4	90	1000000	未断
				1	120	539700	焊缝
				2	110	1000000	未断
3	100	1000000	未断				

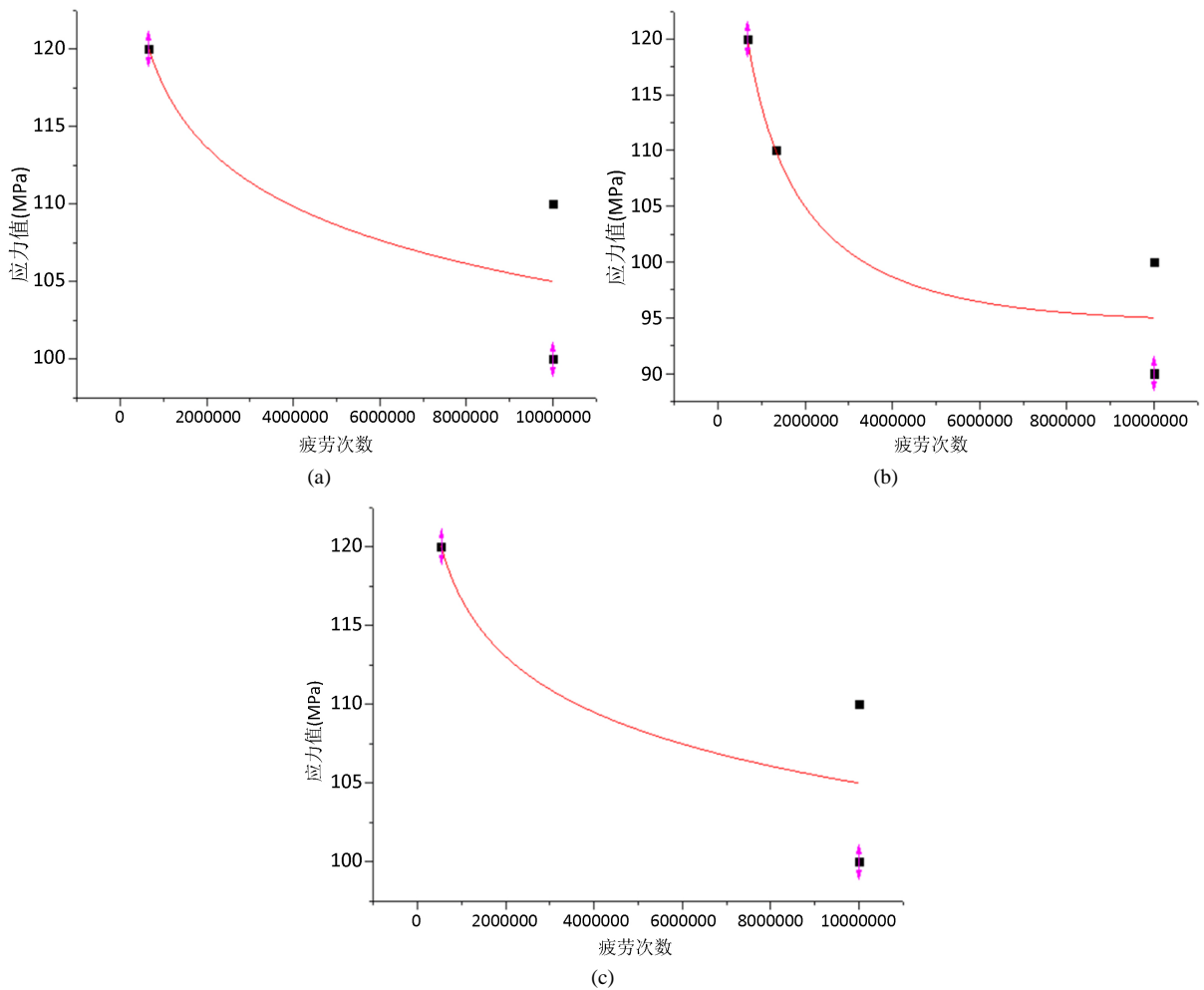


Figure 4. Fatigue S-N curves of A7N01P-T4 aluminum alloy butt joint after being polished by different particle sizes ((a) 40 mesh, (b) 80 mesh, (c) 120 mesh)

图 4. 经不同粒度打磨后 A7N01P-T4 铝合金对接接头疲劳 S-N 曲线((a) 40 目, (b) 80 目, (c) 120 目)

试样的疲劳极限为 110 MPa，7-80 试样的疲劳极限为 100 MPa。

图 5 是经 40 目砂轮打磨 7N01-T4 铝合金对接接头疲劳断口形貌。图 5(a)为疲劳源部，可以看到有放射状纹路汇聚于此，并且可以看出是由于气孔导致疲劳开裂。铝合金焊接时最容易产生的缺陷就是气孔和夹杂，尤其是厚板多层多道焊接时，气体来不及溢出因而会产生大量的气孔。由于气孔的存在导致试样内部几何条件不连续，孔边出现应力集中现象，使孔边应力远高于外部加载应力，滑移带更容易在孔边出现，萌生疲劳裂纹。疲劳裂纹自孔边萌生以后，将沿着与加载应力方向垂直的平面扩展，气孔的存在将影响到裂纹尖端应力强度因子的大小，从而影响到疲劳裂纹扩展速率[6]。图(b)为疲劳裂纹稳定扩展区，辉纹较浅，其扩展的切向方向指向疲劳源，图(c)是断口瞬断区的韧窝形貌，并伴随着气孔。

图 6 为经 80 目砂轮打磨 A7N01P-T4-T4 铝合金对接接头的疲劳断口，可以看出疲劳源位于试样近表面，有放射状纹路收敛于此。稳定扩展区由十分细密的疲劳辉纹组成，并且有二次裂纹穿插其中，瞬断区由大小深浅不一的韧窝组成，韧窝中有第二相粒子分布其中，为韧性断裂的特征。

图 7 为经 120 目砂轮打磨 A7N01P-T4-T4 铝合金对接接头的疲劳断口，可以看出疲劳源位于试样近表面，有放射状纹路收敛于此。稳定扩展区由十分细密的疲劳辉纹组成，瞬断区由大小深浅不一的韧窝组成，韧窝中有第二相粒子分布其中，为韧性断裂的特征。

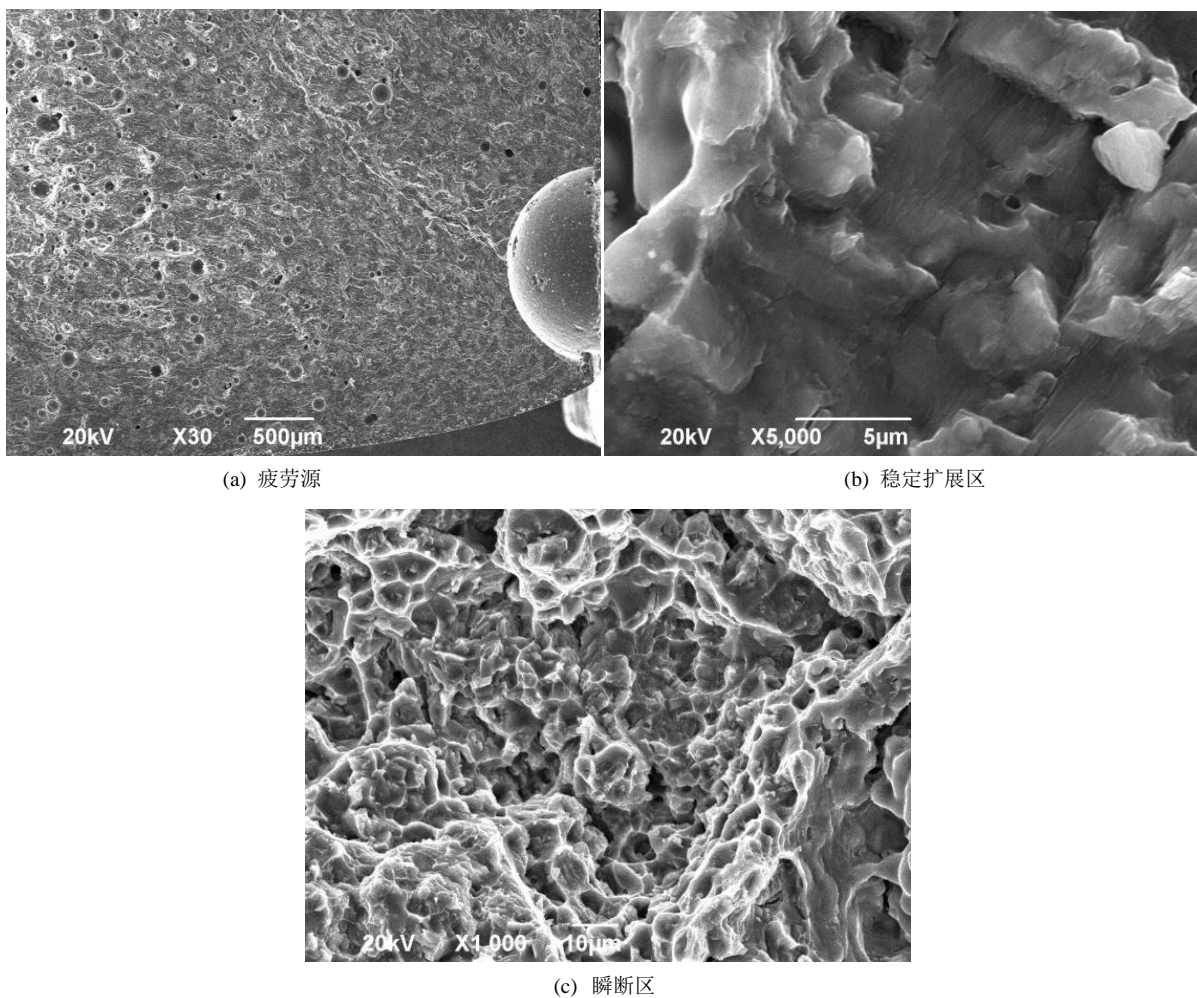


Figure 5. SEM diagram Fatigue fracture of A7N01P-T4 aluminum alloy butt joint after being polished by 40 mesh
图 5. 经 40 目砂轮打磨 A7N01P-T4 铝合金对接接头的疲劳断口 SEM 图

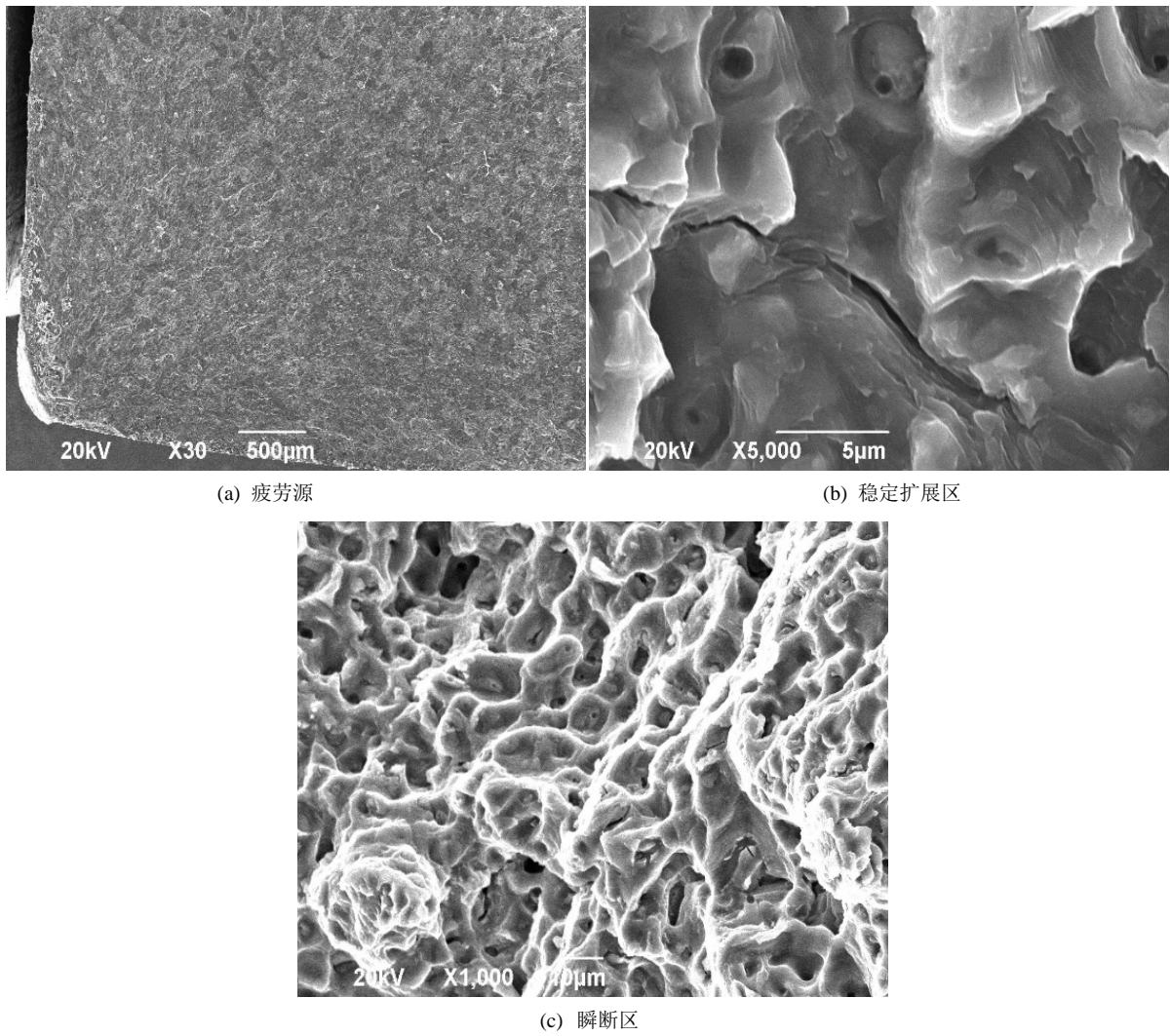
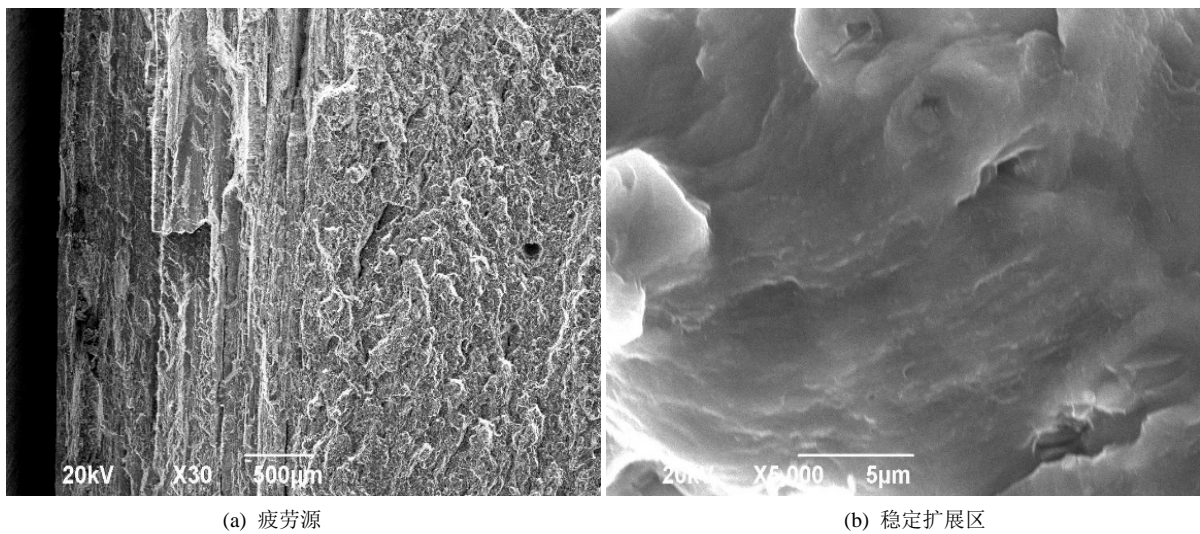
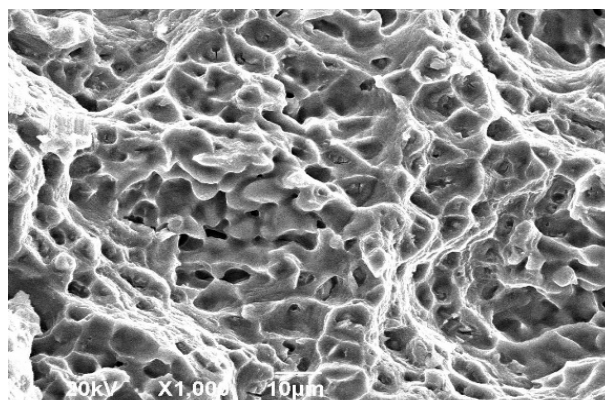


Figure 6. SEM diagram Fatigue fracture of A7N01P-T4 aluminum alloy butt joint after being polished by 80 mesh
图 6. 经 80 目砂轮打磨 A7N01P-T4 铝合金对接接头的疲劳断口 SEM 图





(c) 瞬断区

Figure 7. SEM diagram Fatigue fracture of A7N01P-T4 aluminum alloy butt joint after being polished by 120 mesh**图 7.** 经 120 目砂轮打磨 A7N01P-T4 铝合金对接接头的疲劳断口 SEM 图

4. 结论

(1) 利用 MIG 焊可获得焊接质量比较好的铝合金焊接接头, 拉伸试验结果表明 A7N01P-T4 铝合金焊接接头的抗拉强度低于母材的抗拉强度, 拉伸断口部位位于焊缝中心位置, 可见 A7N01P-T4 铝合金焊接接头的焊缝强度最低, 成为焊接接头的薄弱环节。随着打磨粒度的升高, 焊接接头的拉伸强度和屈服强度均有所下降, 但下降幅度很小。

(2) 焊接接头的显微硬度在焊缝处较低, 且整体上随着远离焊缝显微硬度会慢慢升高, 但是在距离焊缝中心 16 mm 左右处存在软化区。焊接接头显微硬度的变化表明焊接接头在热循环作用下, 其组织发生了一系列复杂的变化。

(3) 在焊接热循环的作用下, 铝合金 A7N01P-T4 焊接接头分为热影响区、焊缝区以及母材区, 在热影响区存在软化区, 在不同的区域有着不同的显微组织结构、第二相分布, 焊缝中心为等轴晶组织, 焊缝边缘形成了柱状晶。熔合区形成柱状晶粒, 熔合区存在严重的化学不均匀性和物理不均匀性。

(4) 不同打磨粒度下铝合金 A7N01P-T4 焊接接头的 S-N 曲线整体变化趋势相同, 随着应力幅值的降低其疲劳寿命升高; 且打磨粒度对其并无明显影响。

(5) 焊接接头疲劳断裂均发生在焊缝处, 焊接接头的疲劳断口包括三部分, 即疲劳裂纹萌生区、疲劳扩展区和瞬断区, 并且各个区域有着不同的断口性貌; 由于焊缝边缘微观组织的不均匀性, 且焊缝中存在气孔等缺陷, 焊接接头疲劳裂纹易于在此处产生, 进而向焊缝处扩展, 最终断裂。

(6) 虽然焊接热循环作用在焊接接头的热影响区形成软化区, 此区域的硬度值较低, 力学性能也有所下降, 但是疲劳断裂仍然没有在此处发生, 说明软化区对 A7N01P-T4 铝合金整体疲劳寿命影响不大, 在进行疲劳性能的改善上应该主要考虑焊接接头。

参考文献 (References)

- [1] 王元良. 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.
- [2] 钱立新. 速度 350km/h 等级世界高速列车技术发展综述[J]. 轨道交通, 2007(11): 42-43.
- [3] Yang, S.L. and Lin, Q.L. (2011) Microstructures and Properties of the Al-4.5Zn-1.5Mg-0.5Mn Aluminum Alloy Welding Metal. *Advanced Materials Research*, **148-149**, 640-643.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.640>
- [4] 邓锐, 李明, 曾要争. 焊缝余高对 A7N01P-T4 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 电力机车与城轨车辆, 2013, 36(6): 52-54.

- [5] 戴忠晨, 赵学武, 云中煌, 吴金津, 李秋实. A7N01P-T4 铝合金 MIG 焊焊接工艺的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(5): 214-216.
- [6] 何超, 崔仕明, 刘永杰, 王清远. 气孔对铝合金焊接接头超长疲劳寿命的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(11): 18-22.

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