

# Effect of Grinding Granularity on Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joint of A6N01 Alloy

Zhonghuang Yun<sup>1</sup>, Zhongchen Dai<sup>1</sup>, Huaipu Ge<sup>1</sup>, Ningning Fu<sup>1</sup>, Ning Xia<sup>1</sup>, Jingnan Sun<sup>1</sup>, Guoqing Gou<sup>2</sup>, Chao Qin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

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

Email: yunzhonghuang@163.com

Received: Jun. 4<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jun. 19<sup>th</sup>, 2017; published: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2017

## Abstract

Aluminum has 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 A6061-T6 aluminum butt joints. The results showed that different size polished aluminum butt joints tensile strength has little difference on elongation. Fatigue limit of welded joints increased with the particle size increases.

## Keywords

A6061-T6 Aluminum, Welded Joints, Grinding Size, Mechanical Properties, Fatigue Properties

# 打磨粒度对A6061-T6铝合金焊接接头组织及性能的影响

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

<sup>1</sup>中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京

<sup>2</sup>西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都

Email: yunzhonghuang@163.com

文章引用: 云中煌, 戴忠晨, 葛怀普, 付宁宁, 夏宁, 孙景南, 苟国庆, 覃超. 打磨粒度对 A6061-T6 铝合金焊接接头组织及性能的影响[J]. 机械工程与技术, 2017, 6(2): 151-158. <https://doi.org/10.12677/met.2017.62021>

收稿日期：2017年6月4日；录用日期：2017年6月19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12 mm厚A6061-T6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，焊接接头的疲劳极限都随着打磨粒度增加而增加。

## 关键词

A6N01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. 试验材料及方法

### 1.1. 试验材料

本试验采用 12 mm 厚 A6061-T6 (固溶处理 + 人工时效) 铝合金板材为试验对象，试验用板材满足 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。A6061-T6 铝合金和 ER5356 焊丝的化学成分如表 1 所示。

焊接采用半自动焊接设备，操作人员为从事现车焊接焊工，具有相应的资质。焊机型号 PHOENIX 421 EXPERT forceArc MIG 焊机。保护气体为高纯氩(Ar 纯度不小于 99.999%)。焊接工艺参数及环境要求按照现车执行，为防止焊接变形，采用刚性固定。焊接工艺参数如表 2。

焊后对焊接试板进行外观检查(VT)、渗透探伤(PT)和射线探伤(RT)，对检测合格的试板取样进行不同粒度(40 目、80 目和 120 目)的焊缝余高打磨。

### 1.2. 试验方法

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 30 N，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，试验速度为 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。

## 2. 试验结果与讨论

### 2.1. 显微组织分析

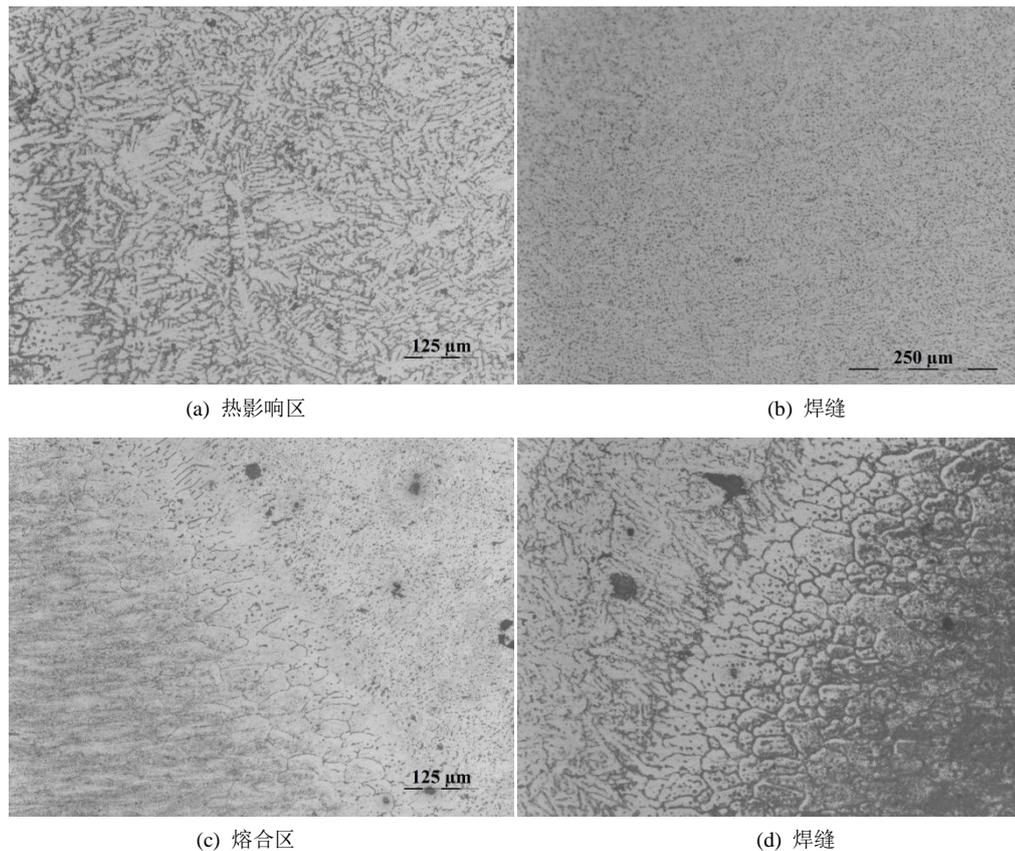
6061-T6 铝合金焊接接头显微组织如图 1，由显微组织可以看出，焊缝为焊接时高温产生铸态组织。

**Table 1.** Main chemical compositions of A6061 alloy and solder wire ER5356  
**表 1.** A6061 铝合金、ER5356 焊丝主要化学成分(wt%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6061	0.4 - 0.8	≤0.40	0.15 - 0.4	<0.15	<0.4	0.05 - 0.25	≤0.25	≤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.** Microstructure of A6061-T6 aluminum alloy butt joint  
**图 1.** A6061-T6 铝合金对接接头显微组织

在熔合区靠近热影响区一端为粗大的晶粒，靠近焊缝一端晶粒较小。热影响区由淬火区和过时效区(软化区)组成，淬火区的组织主要为过饱和  $\alpha$  固溶体，淬火区由于靠近焊缝，受到焊接过程中较高温度热循环的影响，多发生固溶强化，第二相析出物较少；而过时效区(软化区)距离焊缝较远，焊接过程中，受热温度较低，但是又高于铝合金时效温度，处于一种过时效的状态，在这个温度下脱溶相互聚集，形成稳定的  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) 第二相，第二相的析出聚集长大，造成软化区的性能有所下降[1] [2] [3]。

### 2.2. 硬度试验分析

6061 铝合金对接接头硬度曲线如图 2 所示。从硬度曲线上可以看出三条焊缝硬度曲线相差不大。走势也很相近。焊缝硬度值较高，硬度值大约为 60 HV，所有接头硬度随着与焊缝中心距离的增加先上升，再下降，在距离焊缝 4~10 mm 间存在一明显的软化区，硬度最低，约为 40 HV，过了软化区硬度继续上升，直至与母材相同，母材的硬度值低于焊缝，约为 53 HV。

### 2.3. 拉伸性能

表 3 为 A6061-T6 铝合金对接接头拉伸试验数据。可看出 A6061-T6 铝合金 12 mm 对接接头拉伸断裂位置都在热影响区，进一步印证了软化区是整个焊接接头最薄弱的区域。经不同粒度砂轮打磨后，焊接接头的抗拉强度、屈服强度相差不大，抗拉强度都分布在 150~160 MPa 之间，屈服强度在 125~135 MPa 之间，在打磨粒度为 80 目时取得最优的抗拉强度和屈服强度，分别为 159 MPa 和 127 MPa。打磨粒度为 120 目时，延伸率略有降低，为 9.49%，经 40 目和 80 目打磨后的接头的延伸率相差不大。

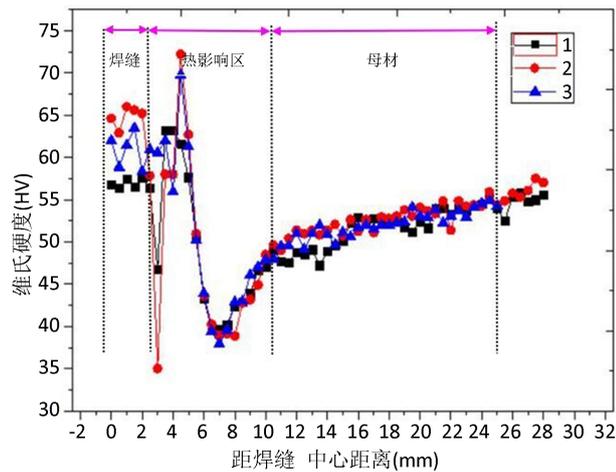


Figure 2. Hardness curve of 12 mm thick A6061-T6 aluminum alloy butt joint

图 2. A6061-T6 铝合金 12 mm 对接接头硬度值曲线

Table 3. Tensile test data of 12 mm thick A6061-T6 aluminum alloy butt joint

表 3. A6061-T6 铝合金 12 mm 对接接头拉伸试验数据

材料	宽度/mm	厚度/mm	抗拉强度/MPa	平均值/MPa	屈服强度/MPa	平均/MPa	延伸率/%	平均值/%	断裂位置
6-40-1	24.82	11.98	164.31		128		11.39		热影响区
6-40-2	24.8	12.36	147.46	158	123	126	10.72	11.21	热影响区
6-40-3	24.92	12	162.84		129		11.52		热影响区
6-80-1	25.3	12.16	157.44		123		12.48		热影响区
6-80-2	24.92	12.12	161.43	159	129	127	12.05	12	热影响区
6-80-3	25	12	160.67		128		11.47		热影响区
6-120-1	25	12	160.86		132		10.08		热影响区
6-120-2	24.86	11.92	162.27	151	133	132	9.6	9.49	热影响区
6-120-3	24.9	12	161.42		133		8.8		热影响区

## 2.4. 疲劳性能

通过表 4 和图 3 我们可以观察到 6-120 试样的疲劳极限为 100 MPa, 6-40 和 6-80 试样的疲劳极限为 90 MPa。断裂的疲劳试样均断于焊缝处, 说明在疲劳试验中焊缝是整个接头最薄弱的区域, 这与硬度、拉伸试验得到的结论并不相符, 然而通过对疲劳断口的分析可以发现, 焊缝由于焊接工艺与过程的影响, 存在数量不等的气孔和夹杂等缺陷, 这些焊接缺陷往往是疲劳裂纹最容易萌生的区域, 因此造成了焊缝在疲劳试验中成为整个接头最薄弱的区域[4]。

图 4(b)显示断口起裂源在试样表面, 可以看出焊缝中存在大量大小不一的气孔, 气孔的存在, 极易成为再服役过程中发生疲劳断裂的起裂源。从图 4 中可见, 在试件中有较多的气孔, 这就可能导致较大的应力集中, 加速疲劳裂纹的扩展, 加快试件的断裂。(b)是裂纹扩展区的疲劳辉纹, (c)是瞬断区韧窝形貌。

图 5 是 80 目打磨 12 mm 厚 A6061-T6 铝合金对接接头疲劳断口的形貌。图(a)显示断口的裂纹源位于试件的表面的一处夹渣, 这可能是厚板多层多道焊时清渣未彻底造成的。图(b)是裂纹扩展区的疲劳辉纹, 辉纹较深, 形貌清晰。图(c)是瞬断区韧窝形貌, 还能观察到气孔的存在。

图 6 是 120 目打磨 12 mm 厚 A6061-T6 铝合金对接接头疲劳断口的形貌。断裂面上有明显的疲劳辉纹, 这是疲劳裂纹扩展时留下的, 并存在二次裂纹。瞬断区断口呈明显的韧窝图样, 这说明该疲劳试件在断裂时也是以塑性断裂的方式断裂的, 说明该试件在疲劳加载过程中发生了塑性变形。由裂纹源区的疲劳断口可以发现一处聚集分布的气孔, 引起疲劳断裂主要原因可能是这些缺陷综合作用的结果。这些缺陷一方面造成应力集中, 另一方面造成截面积的减少。多个缺陷的出现增加了裂纹产生的概率, 从而引起疲劳强度的下降。

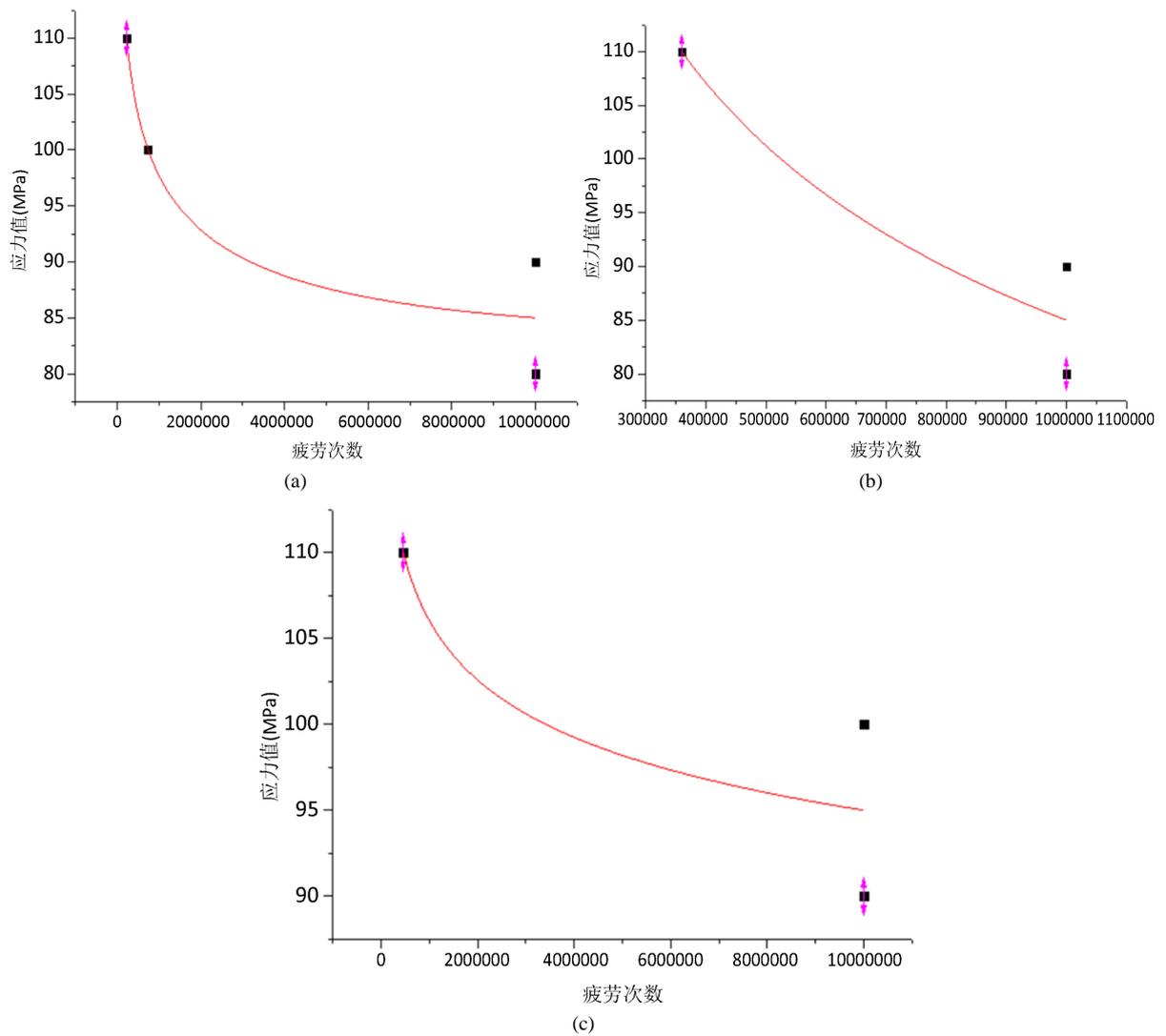
## 3. 结论

(1) 利用 MIG 焊可获得焊接质量比较好的 6061 铝合金焊接接头, 拉伸试验结果表明软化区是整个 6061 铝合金焊接接头最薄弱的区域, 因此不同粒度对焊缝余高的打磨未对接头的抗拉强度和屈服强度造成明显影响。

Table 4. Fatigue data of 12 mm thick A6061-T6aluminum alloy butt joint

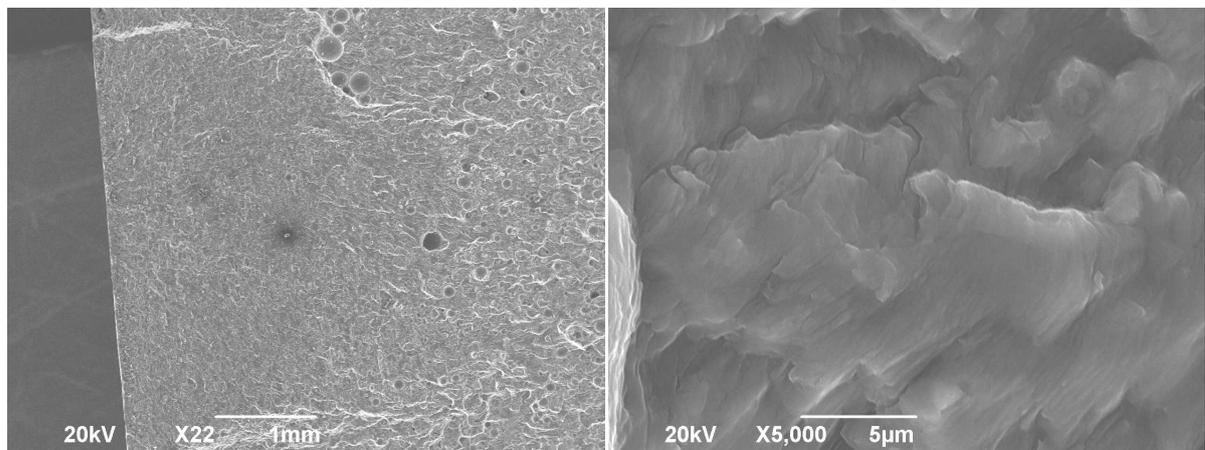
表 4. 12 mm 厚 A6061-T6 铝合金对接接头疲劳数据

材料	板厚/mm	接头形式	打磨片粒度/目	试件编号	载荷/MPa	循环周次	断裂位置
A6061-T6	12	对接	40	1	110	224250	焊缝
				2	100	739300	焊缝
				3	90	1000000	未断
				4	80	1000000	未断
			80	1	110	359782	焊缝
				2	100	894600	焊缝
				3	90	1000000	未断
				4	80	1000000	未断
			120	1	110	461751	焊缝
				2	100	1000000	未断
				3	90	1000000	未断



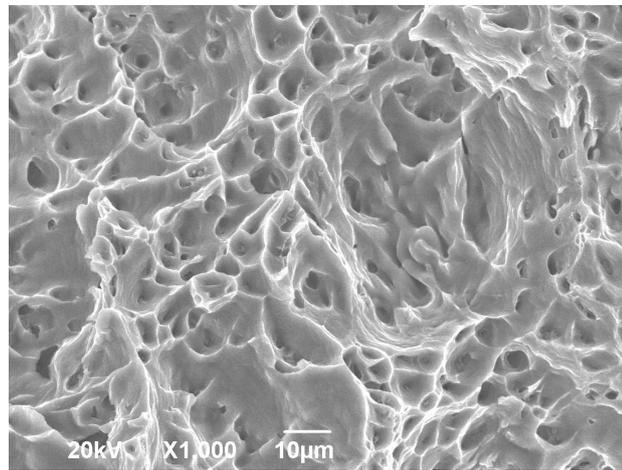
**Figure 3.** Fatigue S-N curves of 12 mm thick A6061-T6 aluminum alloy butt joint after being polished by different particle sizes ((a) 40 mesh, (b) 80 mesh, (c) 120 mesh)

**图 3.** 不同粒度打磨后的 12 mm 厚 A6061-T6 铝合金对接接头疲劳 S-N 曲线((a) 40 目, (b) 80 目, (c) 120 目)



(a) 疲劳源

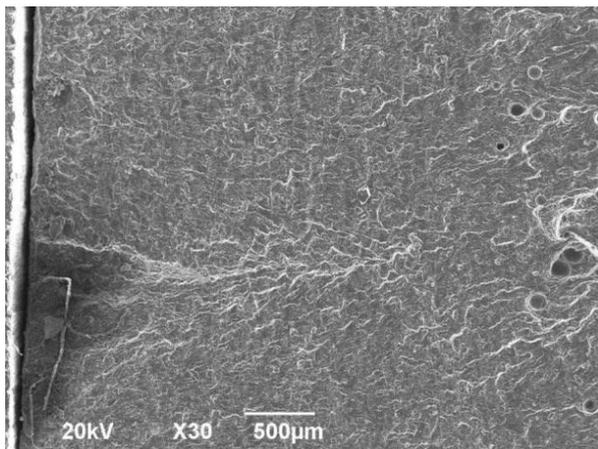
(b) 裂纹扩展区



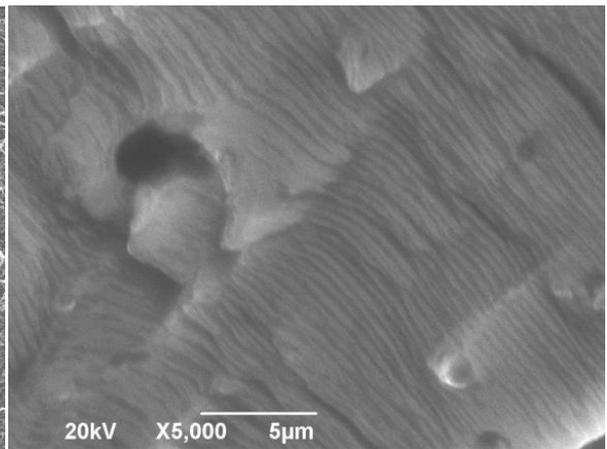
(c) 瞬断区

**Figure 4.** Fatigue S-N curves of 12 mm thick A6061-T6 aluminum alloy butt joint after being polished by different particle sizes ((a) 40 mesh, (b) 80 mesh, (c) 120 mesh)

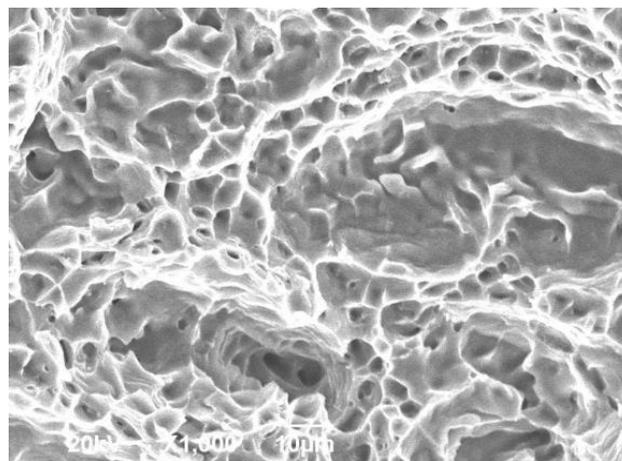
**图 4.** 不同粒度打磨后的 12 mm 厚 A6061-T6 铝合金对接接头疲劳 S-N 曲线((a) 40 目, (b) 80 目, (c) 120 目)



(a) 疲劳源



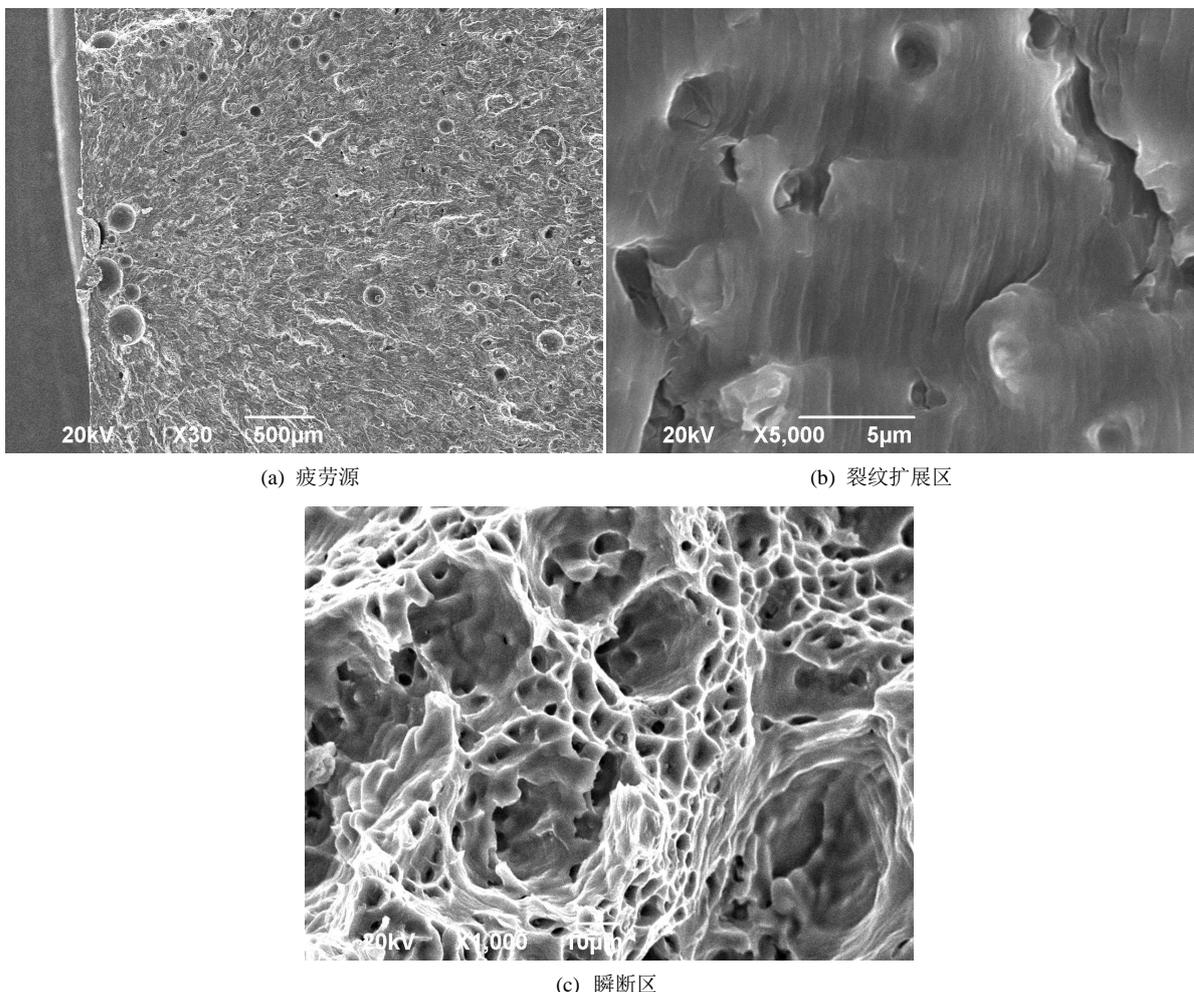
(b) 裂纹扩展区



(c) 瞬断区

**Figure 5.** Fatigue fracture of 12 mm thick A6061-T6 aluminum alloy butt joint after being polished by 80 mesh

**图 5.** 经 80 目砂轮打磨后 12 mm 厚 A6061-T6 铝合金对接接头的疲劳断口图



**Figure 6.** Fatigue fracture of 12 mm thick A6061-T6 aluminum alloy butt joint after being polished by 120 mesh  
**图 6.** 经 120 目砂轮打磨后 12 mm 厚 A6061-T6 铝合金对接接头的疲劳断口图

(2) 焊接接头的显微硬度在焊缝处最高,在热影响区中存在一软化区,是整个接头硬度值最低的区域,也是力学性能最差区域。

(3) 不同打磨粒度下铝合金 6061 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;且随着打磨粒度的增加,焊接接头的疲劳极限有所降低。

(4) 焊接接头疲劳断裂发生在焊缝处,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;由于焊缝中组织的不均匀性,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。

### 参考文献 (References)

- [1] 赵世航. 6082-T6 铝合金双 MIG 焊接头组织和性能的研究[J]. 吉林大学学报, 2010, 5(5): 105-107.
- [2] 过福权. 铝合金在铁道车辆上应用的探讨[J]. 中国金属通报, 2011, 6(3): 77-84.
- [3] Praveen, P. and Yarlagadda, P.K.D.V. (2005) Meeting Challenges in Welding of Aluminum Alloys through Pulse Gas Metal Arc Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, **164-165**, 1106-1112.
- [4] 薛小怀, 邓正才, 杨淑芳, 俞海良, 楼松年. 6061 铝合金气孔敏感性研究[C]. 2003 汽车焊接国际论坛论文集, 2003: 310-314.