

# 氧化膜对6082铝合金搅拌摩擦焊接头 疲劳性能的影响

张欣盟<sup>1</sup> 何广忠<sup>1</sup> 王贝贝<sup>2,3</sup> 杨超<sup>2</sup> 薛鹏<sup>2</sup> 倪丁瑞<sup>2</sup> 马宗义<sup>2</sup>

1 中车长春轨道客车股份有限公司 长春 130062

2 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家研究中心 沈阳 110016

3 东北大学材料科学与工程学院 沈阳 110819

**摘要** 对6 mm厚的6082-T6铝合金进行两种表面处理然后实施搅拌摩擦焊接,研究了对接面氧化膜对接头组织和疲劳性能的影响。结果表明,进行速度为1000 mm/min的高速焊接时,对接面未打磨和打磨的接头焊接质量都良好,接头强度系数达到81%;两种接头的疲劳性能基本相同,疲劳强度均为100 MPa;少数样品在焊核区外断裂,大部分样品在热影响区断裂。与接头相比,两种接头焊核区的疲劳性能有所提高,均为110 MPa,在疲劳测试中裂纹并未沿“S”线萌生和扩展。

**关键词** 金属材料, 铝合金, 搅拌摩擦焊接, 氧化膜, 疲劳性能

中图分类号 TG457

文章编号 1005-3093(2019)04-0299-07

## Influence of Oxide Film on Fatigue Property of Friction Stir Welded 6082 Al Alloy

ZHANG Xinmeng<sup>1</sup>, HE Guangzhong<sup>1</sup>, WANG Beibei<sup>2,3</sup>, YANG Chao<sup>2</sup>, XUE Peng<sup>2</sup>,  
NI Dingrui<sup>2</sup>, MA Zongyi<sup>2</sup>

1 CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China

2 Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3 School of Materials Science and Engineering, Northeast University, Shenyang 110819, China

Correspondent: XUE Peng, Tel: (024)83978630, E-mail: pxue@imr.ac.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51331008)

Manuscript received 2018-10-22, in revised form 2019-01-28

**ABSTRACT** The polished and as received 6082-T6 Al sheets of 6 mm in thickness were subjected to friction stir welding (FSW) aiming to reveal the effect of surface oxide film on the microstructure and fatigue property of the FSW joint. The results show that high quality FSW joints with a high joint strength coefficient of 81% could be produced by a high welding speed of 1000 mm/min, for the unpolished and polished butt surfaces. Similar fatigue properties were obtained for the two type of FSW joints with the above two surface states, and the fatigue strength was 100 MPa. Most weld joints failed at the heat affected zones, and only a few weld joints failed at the nugget zone (NZ) during fatigue tests. The fatigue strength increased to 110 MPa for the NZ for plates with the above two surface states, and it is revealed during fatigue test that the fatigue cracks did not initiate on and propagate along the so called “S-line”.

**KEY WORDS** metallic materials, Al alloys, friction stir welding, oxide film, fatigue property

资助项目 国家自然科学基金(51331008)

收稿日期 2018-10-22 定稿日期 2019-01-28

作者简介 张欣盟,男,1980年生,高级工程师

通讯作者 薛鹏,副研究员,pxue@imr.ac.cn,研究方向为搅拌摩擦焊接与加工、超细晶材料的力学行为

DOI 10.11901/1005.3093.2018.625

在轨道列车的高速运行过程中,车体中的焊接接缝可能发生疲劳破坏。轨道列车车体结构件的疲劳断裂,是焊接结构失效的一种主要形式。搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW),是铝合金列车车体制造中最受关注的焊接技术。由于其热输入低,热

变形小、残余应力低,特别适合列车车体这种大型框架结构的精密焊接。目前,国内外已将FSW技术用于制造高速列车的车体。FSW是一种固相焊接技术,焊缝区的组织具有细化的锻造态组织,接头的力学性能尤其是疲劳性能优于熔化焊接的接头<sup>[1-3]</sup>。

但是,影响铝合金焊接接头疲劳性能的因素很多,包括接头的表面质量、焊缝区的微观组织、残余应力以及第二相粒子等。尤其是FSW焊缝中的特殊“S”线(包括根部残留氧化膜部分)组织,虽然对接头的静态力学性能影响不大,但是显著影响接头的动态疲劳性能,使疲劳性能明显降低<sup>[4,5]</sup>。Zhou等<sup>[4]</sup>的研究结果表明,“S”线使5083和2024的FSW接头的疲劳性能分别降低35%和55%,且疲劳断裂时优先在根部“S”线处开裂。“S”线的形貌和存在形态,与焊接过程中材料的流动行为密切相关<sup>[6]</sup>。Sato等<sup>[7]</sup>的研究证实,形成“S”线的原因是搅拌针的剧烈搅动使母材(Base Material, BM)对接面的氧化膜破碎而随材料流动并重新分布。

在铝合金FSW前对工件对接面进行机械打磨处理可去除原始的氧化膜,但是铝在空气中极易氧化生成致密的氧化膜薄层。因此,即使焊前进行机械打磨,焊核区(Nugget Zone, NZ)的“S”线仍然存在<sup>[8]</sup>。制造列车的材料多为长直的板材或型材,机械打磨的工作量非常大。同时,人工处理不仅费时费力且难以统一标准,还给焊接制造带来不确定性。因此,在铝合金FSW前只进行简单的表面除油污处理而不进行机械打磨,可节约成本、提高生产效率。

在高速列车车体的制造过程中高速度焊接可提高生产效率,但是使FSW过程中材料的流动性降低,不利于氧化膜的破碎,使“S”线更为明显。鉴于此,本文对制造高速列车车体用的6082铝合金实行1000 mm/min的高速度FSW,焊前对BM分别进行不机械打磨和机械打磨两种处理,研究两种FSW接头的疲劳断裂行为。

## 1 实验方法

实验用材料为6082-T6铝合金,尺寸为1000 mm×200 mm×6 mm,其主要化学成分(质量分数,%)列于表1。

FSW实验使用H13钢焊接工具,轴肩的直径为20 mm,搅拌针为M8的锥形螺纹针,长度为5.73 mm。

焊接时转速为1000 r/min,行进速度为1000 mm/min,在焊接过程中采用恒压力控制,压力为20 KN,倾角为1.5度。焊接时选用两种表面处理的BM,一种经过机械打磨和丙酮去除油污处理,一种只是用丙酮去除表面油污。

使用Olympus Corporation HC-300Z/OL型光学显微镜和Zeiss Supra 55型扫描电镜分析接头和断后样品的微观组织。垂直于焊缝的横截面截取金相样品,样品经打磨、机械抛光后用体积分数10%的NaOH溶液腐蚀,进行金相观察。使用Leco-LM-247AT型显微硬度试验机测试接头横截面显微硬度分布曲线,沿焊缝中心线每隔1 mm打点,测试载荷为500 g,保压时间为15 s。使用SANS-CMT5205电子万能试验机进行室温拉伸试验,应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。使用GPS 20高频疲劳试验机对接头进行应力控制的高周疲劳测试,应力比R为0.1,频率为110 Hz。在垂直于焊缝方向切取拉伸和疲劳样品。为了接近实际应用工况,只对表面飞边进行简单处理以保留表面“鱼鳞纹”结构,样品的长度200 mm,标距部分长40 mm,宽12 mm,厚度6 mm。使用弧形样品测试接头NZ的疲劳性能,弧顶处宽度5 mm,厚度6 mm,疲劳测试条件与测试接头时相同。

## 2 结果和讨论

### 2.1 接头的微观组织和常规力学性能

图1给出了垂直于焊缝方向的FSW接头横截面宏观金相组织(焊前未机械打磨样品标记为“Unpolished”,打磨样品标记为“Polished”)。从图1可以看出,无论焊前机械打磨与否其NZ的形貌基本相同,均呈现出典型的盆状结构。同时,与常规的铝合金FSW接头一样<sup>[1]</sup>,接头分为NZ、热机械影响区(Thermal-mechanical Affected Zone, TMAZ)、热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)和BM四部分。在NZ可观察到一条曲折的“S”线,且其清晰程度与焊前的机械打磨处理关系不大,甚至焊前打磨样品的“S”线更清晰。因此,对板材进行焊前机械打磨并不是决定“S”线的出现和是否清晰的关键因素。

图2给出了两种接头试样沿横截面中心线的硬度曲线图。可以看出,焊前未打磨与打磨样品的硬度分布曲线基本一致,均呈现出常规铝合金FSW接头的“W”形分布<sup>[9-11]</sup>。6082-T6铝合金BM的显微硬

表1 6082铝合金化学成分(% ,质量分数)  
Table 1 Chemical composition of 6082Al alloy (mass fraction, %)

Material	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
6082Al	0.6-1.2	0.7-1.3	0.5	0.1	0.4-1.0	0.25	0.2	0.1	Bal.

度最高,为115 Hv。由于FSW过程中焊接热源的作用,焊缝区的沉淀强化相发生溶解或粗化<sup>[1]</sup>,硬度均低于BM。在NZ两侧的HAZ内均可观察到最低硬度区,硬度值为82 Hv。这表明,与大多数6082-T6铝合金FSW接头最低硬度值(<70 Hv)相比<sup>[12,13]</sup>,本文实验中的最低硬度值有明显提高。其原因是,焊接速度的提高使最低硬度区的高温停留时间缩短而减弱了最低硬度区的析出相粗化<sup>[14-16]</sup>。在FSW过程中在高温条件下发生的剧烈塑性变形使NZ发生了动态再结晶,晶粒明显细化<sup>[1,17-19]</sup>,因此与最低硬度区相

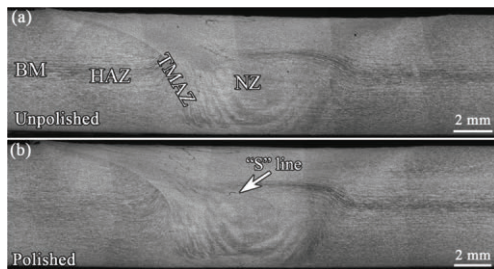


图1 对接面未打磨和打磨的6082铝合金FSW接头的典型宏观形貌

Fig.1 Macrostructure of various FSW joints with unpolished butt surface (a) and polished butt surface (b) (NZ—nugget zone, TMAZ—thermo-mechanically affected zone, HAZ—heat-affected zone)

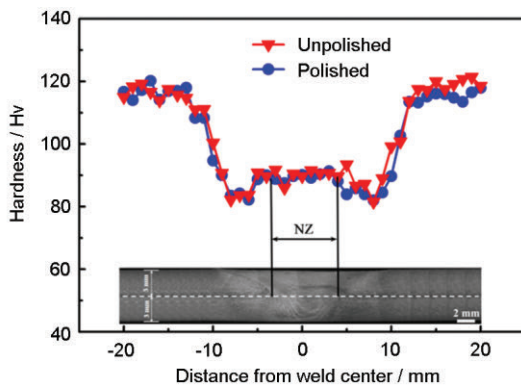


图2 6082铝合金FSW接头横截面的硬度曲线分布

Fig.2 Microhardness profiles of the FSW joints of 6082 Al alloys with different butt surface treatment methods

比NZ硬度有所回升,达到90 Hv。

两种接头试样的拉伸性能列于表2。从表2可以看出,BM的屈服强度为293 MPa,抗拉强度为324 MPa,延伸率为12.9%。经过FSW的热循环作用后接头的拉伸性能明显降低,而不同表面处理的FSW接头拉伸性能几乎完全相同,均断裂在HAZ。表面未打磨和打磨的FSW接头屈服强度分别为170 MPa和172 MPa,抗拉强度均为262 MPa,焊接强度系数达到81%,明显高于低焊速下FSW接头的拉伸性能(焊接强度系数通常在70%左右)<sup>[12,13]</sup>。由于焊接接头的局部变形,与BM相比FSW接头的延伸率明显降低,表面未打磨和打磨的FSW接头延伸率分别为7.4%和7.1%。

## 2.2 接头的高周疲劳性能

图3给出了表面未打磨和打磨的6082-T6铝合金FSW接头的疲劳应力-寿命(*S-N*)曲线。由图3a可知,对于表面未打磨样品,当应力幅降到120 MPa时就有FSW接头循环至 $10^7$ 周次而不断裂。但是在应力幅为110 MPa时,仍有样品循环周次未达到 $10^7$ 周次。根据对*S-N*曲线的拟合数据分析,表面未打磨6082-T6铝合金FSW接头的疲劳强度为100 MPa。表面打磨的铝合金FSW接头的疲劳性能与表面未打磨的类似,根据*S-N*曲线的拟合数据分析,其疲劳强度也为100 MPa(图3b)。

对于两种表面状态的铝合金FSW接头,高周疲劳断裂测试时其断裂模式基本相同,本文仅以表面未打磨的FSW接头为例进行说明。无论是在高应力幅还是低应力幅作用下,FSW接头样品大部分在HAZ位置断裂,如图4a所示。而在较高应力幅时,有少数样品在NZ位置断裂,如图4b所示。但是,即使断裂在NZ裂纹也并未沿“S”线扩展。这表明,“S”线并不是影响6082-T6铝合金FSW接头疲劳性能的关键因素。这个结果,与之前报道的常规FSW接头的疲劳断裂模式类似。铝合金FSW接头在疲劳测试过程中并不会沿“S”线开裂,而只有经过重新固溶热处理或者存在根部未焊透时,表面氧化膜所形成的“S”线

表2 6082-T6铝合金FSW接头及NZ的拉伸性能和疲劳性能

Table 2 Tensile and fatigue properties of the FSW joint of 6082-T6 Al alloy and the NZ

Samples	Yield strength /MPa	Ultimate tensile strength/MPa	Elongation /%	Fatigue strength /MPa	
Base material	293	324	12.9	180	
Unpolished surface	Joint	170	262	7.4	100
	NZ	200	269	26.5	110
Polished surface	Joint	172	262	7.1	100
	NZ	204	272	23.5	110

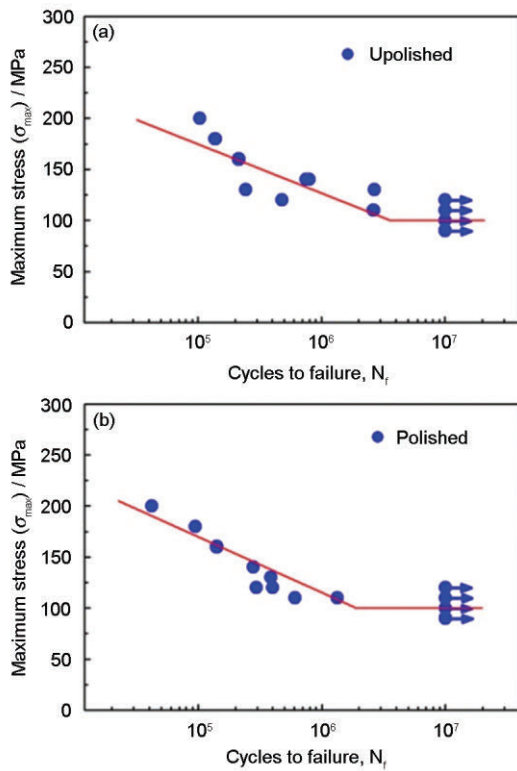


图3 对接面未打磨和打磨的6082铝合金FSW接头的S-N曲线

Fig.3 S-N curves of the FSW joints of 6082 Al alloys with (a) unpolished butt surfaces, (b) polished butt surfaces

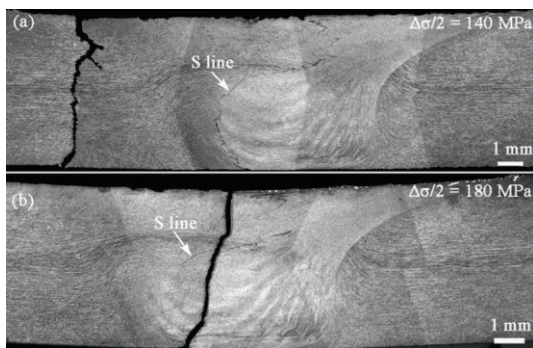


图4 对接面未打磨FSW接头疲劳后断于HAZ和断于NZ的横截面断裂形貌

Fig. 4 Cross-sectional macrostructures of the FSW joints with unpolished butt surfaces (a) failed at HAZ, (b) failed at NZ

及弱连接才对疲劳性能产生明显的影响<sup>[4,5]</sup>。

两种表面处理状态的铝合金FSW接头在高周疲劳断裂测试时,其断口形貌均呈现出经典的疲劳断裂模式,本文仅选取断裂在HAZ和NZ两种典型形貌加以论述。图5给出了最大应力幅为200 MPa时对接面未打磨样品的断口典型形貌,接头沿HAZ断裂。从宏观形貌可见,断口可分为三个区域,即裂纹萌生区1区,裂纹扩展区2区和瞬时断裂区3区,如图5a所示。裂纹萌生区并不明显,扩展区和瞬时

断裂区界线则比较清晰。从图5b可以看出,裂纹从靠近轴肩边缘的表面“鱼鳞纹”处萌生,裂纹萌生区的形貌比较平坦,呈现出解理形貌特征。裂纹扩展区比较明显,呈现出典型的解理形貌,且有些解理面非常大,长度可达到200 μm(图5c),这是6082铝合金BM在轧制及后续热处理过程中形成的粗大晶粒组织造成的<sup>[1]</sup>。在200 MPa的高应力下最后的瞬时断裂区面积比较大,几乎占了整个样品面积的一半,且其断口形貌与静态断裂时的断口形貌类似,呈现出明显的韧窝状形貌,如图5d所示。

图6给出了最大应力幅为160 MPa时对接面未打磨样品的断口典型形貌,接头断裂在NZ。从其宏观断口形貌可见,断口清晰地分为三个区域,如图6a所示。此时裂纹从样品边角表面处萌生,且萌生区面积较小,表面较为平坦,可观察到沿晶断裂和解理断裂的形貌特征(图6b)。而裂纹扩展区形貌与断裂在HAZ的样品不同,可观察到明显的疲劳辉纹和二次裂纹形貌(图6c)。与图5中的样品相比,由于最大应力幅降低,此时瞬时断裂区的面积有所减小,也呈现出韧窝状的静态断裂特征,如图6d所示。

### 2.3 焊核区的力学性能

从上述研究结果可见,两种FSW接头拉伸及疲劳测试时大部分断裂于HAZ,为了研究NZ的本征性能和“S”线是否对其产生影响,本文还针对NZ的样品进行了拉伸及高周疲劳性能研究。两种FSW接头NZ的拉伸性能列于表2。从表2可见,对接面未打磨和打磨的接头NZ的拉伸性能基本相同,且与FSW接头相比屈服强度提高较为明显,分别达到200 MPa和204 MPa,最高提高了34 MPa;抗拉强度仅略有提高,分别为269 MPa和272 MPa,最高提高了10 MPa。与BM相比NZ的强度仍有明显的降低,而延伸率明显提高,对接面未打磨和打磨的接头NZ样品的延伸率分别达到26.5%和23.5%。显然,在FSW过程中的剧烈塑性变形和热循环作用后NZ的强化相发生溶解或粗化,使力学性能明显降低<sup>[4,5,17,18]</sup>。而接头NZ组织发生了明显的细化,根据Hall-Petch关系其力学性能与接头相比仍有提高,尤其是对晶粒尺寸更为敏感的屈服强度提高得更为明显<sup>[20]</sup>。

图7给出了两种铝合金FSW接头NZ的疲劳S-N曲线。图7表明,两种样品的疲劳S-N曲线基本相同,根据S-N曲线拟合数据疲劳强度均为110 MPa。由于拉伸强度的提高,NZ的疲劳强度比FSW接头的疲劳强度(100 MPa)略有提高。从图8所示的对接面未打磨样品断裂后的典型横截面形貌可见,在疲劳过程中裂纹并没有沿着“S”线(图中箭头所示)萌

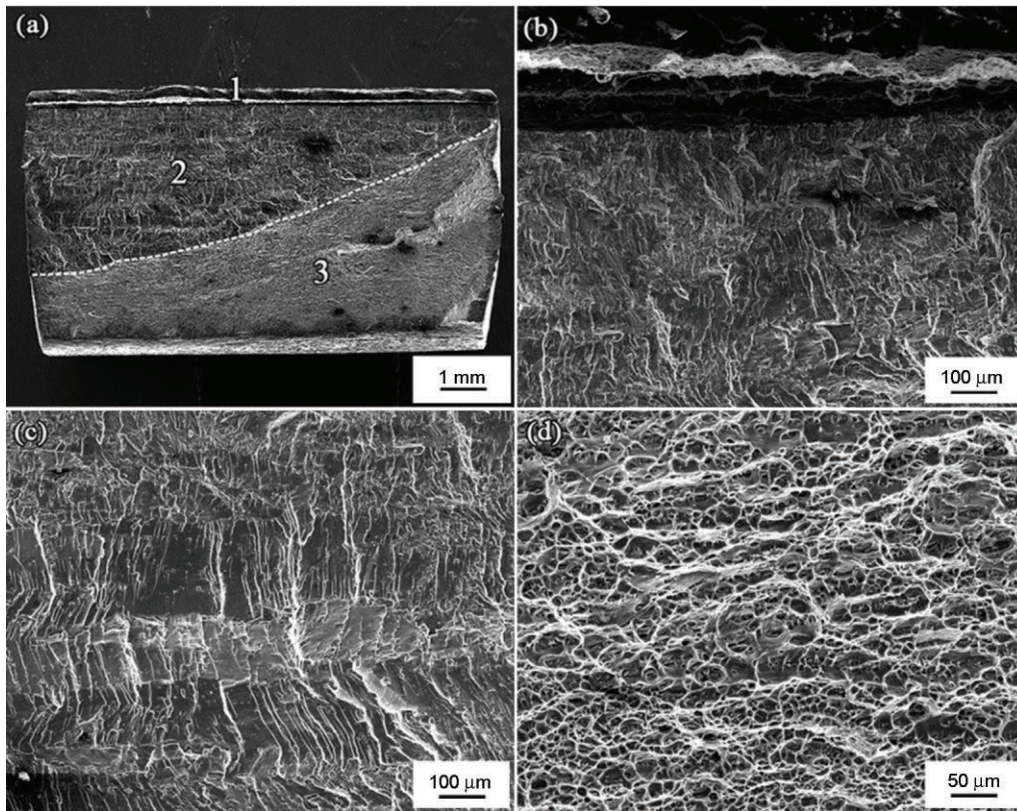


图5 对接面未打磨FSW接头断裂在HAZ的典型断口形貌

Fig.5 Typical morphologies of the fractured surfaces of the FSW joint failed at the HAZ with unpolished butt surface (a) macrostructure, (b) crack initiation zone, (c) crack propagation zone, (d) fast fracture zone

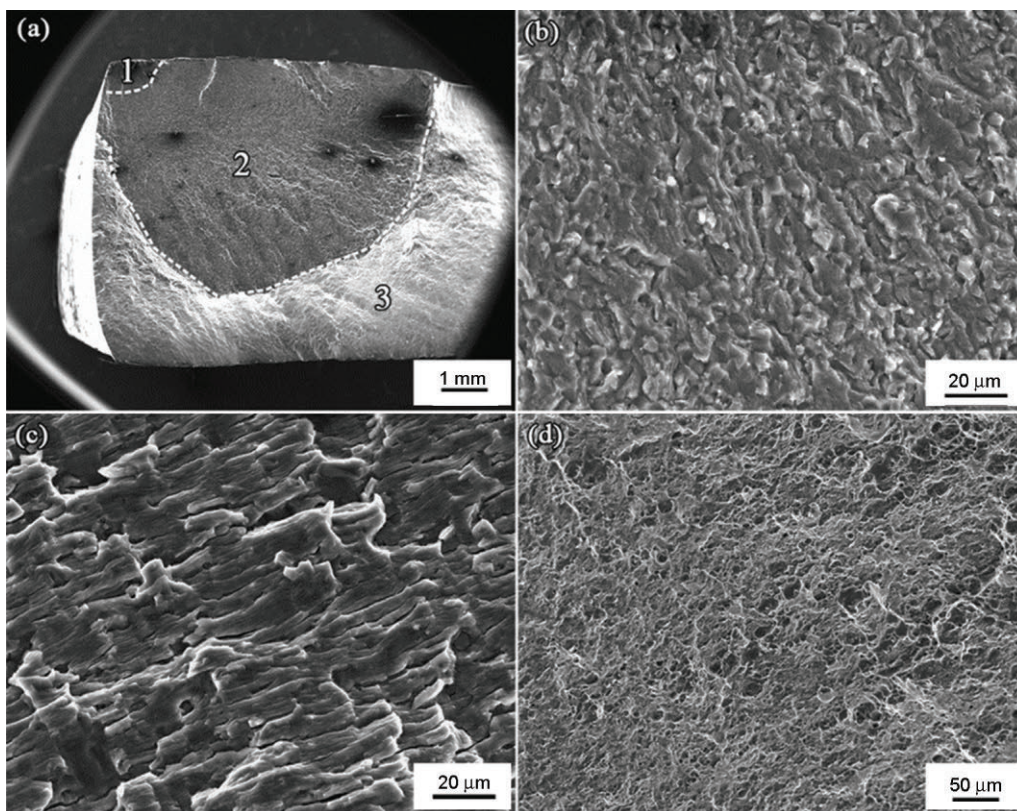


图6 对接面未打磨FSW接头断裂在NZ的典型断口形貌

Fig.6 Typical morphologies of the fractured surfaces of the FSW joint failed at the NZ with unpolished butt surface (a) macrostructure, (b) crack initiation zone, (c) crack propagation zone, (d) fast fracture zone

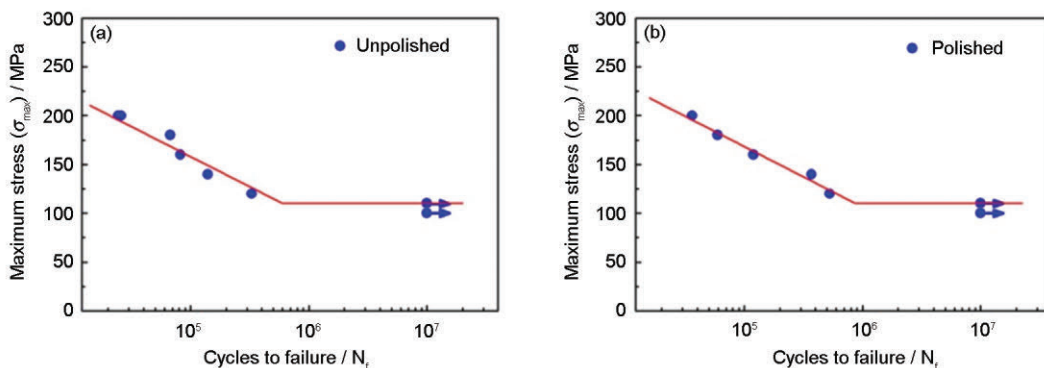


图7 对接面未打磨和打磨的FSW接头NZ的S-N曲线  
**Fig.7** S-N curves of the NZs with unpolished butt surfaces (a) and polished butt surfaces (b)

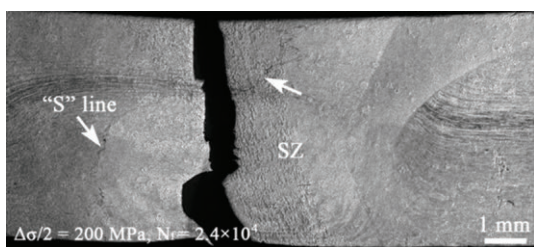


图8 对接面未打磨FSW接头NZ疲劳后横截面断裂形貌

**Fig.8** Cross-sectional macrostructures of NZ after fatigue tests with unpolished butt surface

生和扩展,显然初始对接面氧化膜所形成的“S”线对NZ疲劳性能没有明显的影响。

对接面未打磨和打磨的FSW接头NZ的疲劳断口形貌基本相同,且与FSW接头断裂在NZ位置的断口形貌类似,其典型的断口形貌如图9所示。从其宏观断口形貌可以看出,断口也可以清晰地分为三个区域,如图9a所示。此时裂纹从样品边角表面处萌生,且萌生区面积较小,表面较为平坦,从断口形貌可观察到明显的沿晶断裂形貌特征(图9b)。在裂纹扩展区也可观察到明显的疲劳辉纹和二次裂纹形貌(图9c)。

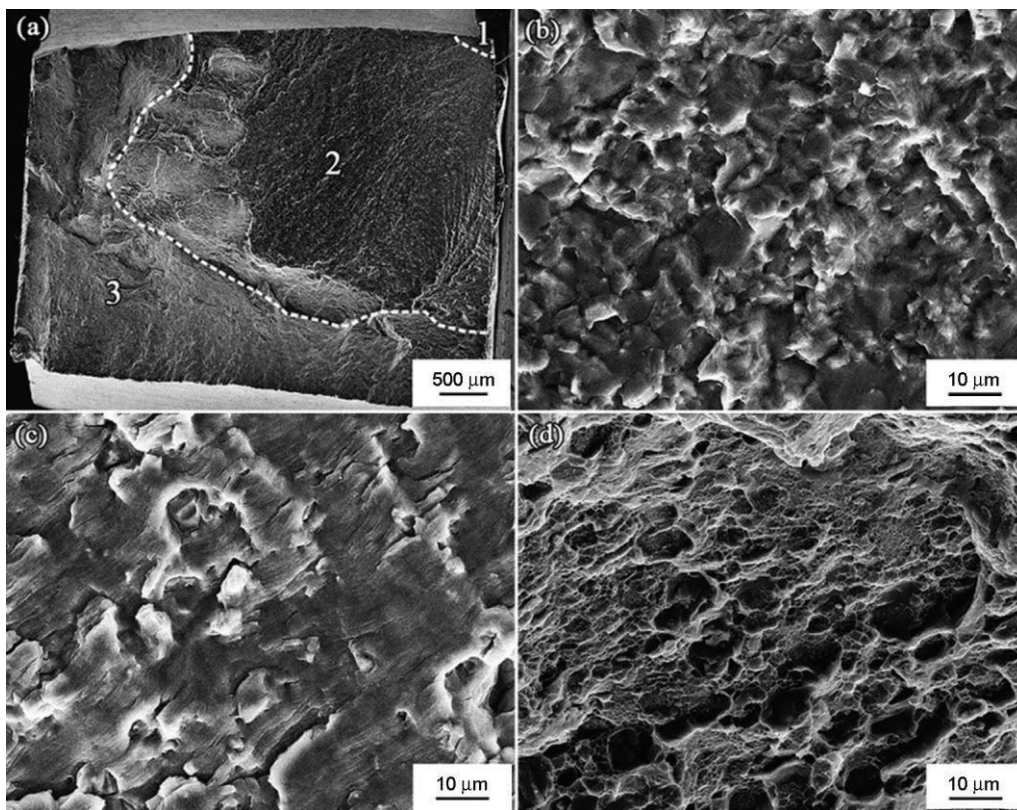


图9 对接面未打磨FSW接头NZ样品的典型断口形貌

**Fig.9** Typical morphologies of the fractured surfaces of the NZ with unpolished butt surface (a) macrostructure, (b) crack initiation zone, (c) crack propagation zone, (d) fast fracture zone

瞬时断裂区形貌也与常规FSW接头断口相同,呈现出韧窝状的静态断裂特征,如图9d所示。

综上所述,由于铝合金表面氧化膜生成极快,FSW过程中的剧烈塑性变形将表面氧化膜破碎并重新分布形成“S”线<sup>[1,6,7]</sup>,因此对接面未打磨和打磨处理对FSW接头的拉伸性能和疲劳性能并没有明显的影响。即使是1000 mm/min的高焊接速度氧化膜的破碎也非常充分,在疲劳测试过程中裂纹并未沿“S”线优先萌生和扩展。这些结果表明,对于铝合金的FSW,只进行焊前油污清洗处理即可,无需进行机械打磨处理。

### 3 结论

在转速为1000 r/min、焊接速度为1000 mm/min条件下对对接面未打磨和打磨的两种6082-T6铝合金板材进行搅拌摩擦焊,都能得到无缺陷的焊接接头,接头的拉伸强度系数达到81%。对接面未打磨和打磨的两种接头的疲劳性能基本相同,疲劳强度均为100 MPa,在疲劳测试过程中大部分样品断裂在HAZ,少数样品断裂在NZ。断口呈现出典型的疲劳断口形貌,主要分为裂纹萌生区、扩展区和瞬时断裂区三个部分。对接面未打磨和打磨的两种接头NZ的疲劳性能基本相同,疲劳强度与接头相比有所提高,均为110 MPa,疲劳测试过程中裂纹并未沿“S”线萌生和扩展。

### 参考文献

- [1] Mishra R S, Ma Z Y, Friction stir welding and processing [J]. Mater. Sci. Eng., 2005, 50R: 1
- [2] Wang K S, Zhang X L, Wang X H, et al. Comparison of fatigue properties between friction stir welds and TIG welds for Al alloy [J]. Chin. J. Mater. Res., 2009, 23: 1  
(王快社, 张小龙, 王训宏等. 搅拌摩擦与氩弧焊铝合金接头疲劳性能比较 [J]. 材料研究学报, 2009, 23: 1)
- [3] Xue P, Zhang X X, Wu L H, et al. Research progress on friction stir welding and processing [J]. Acta Metall. Sin., 2016, 52: 1222  
(薛鹏, 张星星, 吴利辉等. 搅拌摩擦焊接与加工研究进展 [J]. 金属学报, 2016, 52: 1222)
- [4] Zhou C Z, Yang X Q, Luan G H. Effect of oxide array on the fatigue property of friction stir welds [J]. Scripta Mater., 2006, 54: 1515
- [5] Jolu T L, Morgeneyer T F, Gourgues-Lorenzon A F. Effect of joint line remnant on fatigue lifetime of friction stir welded Al-Cu-Li alloy [J]. Sci. Technol. Weld. Joining, 2010, 15: 694
- [6] Zeng X H, Xue P, Wang D, et al. Effect of processing parameters on plastic flow and defect formation in friction-stir-welded aluminum alloy [J]. Metall. Mater. Trans., 2018, 49A: 2673
- [7] Sato Y S, Yamashita F, Sugiura Y, et al. FIB-assisted TEM study of an oxide array in the root of a friction stir welded aluminium alloy [J]. Scripta Mater., 2004, 50: 365
- [8] Ren S R, Ma Z Y, Chen L Q. Effect of initial butt surface on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Mater. Sci. Eng., 2008; A479: 293
- [9] Liu X Q, Liu H J, Wang T H, et al. Correlation between microstructures and mechanical properties of high-speed friction stir welded aluminum hollow extrusions subjected to axial forces [J]. J. Mater. Sci. Technol., 2018, 34: 105
- [10] Wang G Q, Zhao Y H, Hao Y F. Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing [J]. J. Mater. Sci. Technol., 2018, 34: 73
- [11] Wang B B, Chen F F, Liu F, et al. Enhanced mechanical properties of friction stir welded 5083Al-H19 joints with additional water cooling [J]. J. Mater. Sci. Technol., 2017, 33: 1009
- [12] Wang X J, Wei X L, Zhang L L. Microstructural evolution and mechanical properties of friction stir welded 6082-T6 aluminum alloy [J]. Trans. China Weld. Inst., 2018, 39: 1  
(王希靖, 魏学铃, 张亮亮等. 6082-T6铝合金搅拌摩擦焊组织演变与力学性能 [J]. 焊接学报, 2018; 39: 1)
- [13] Scialpi A, De Filippis L A C, Cavaliere P. Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy [J]. Mater. Des., 2007, 28: 1124
- [14] Liu F C, Ma Z Y. Influence of tool dimension and welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded 6061-T651 aluminum alloy [J]. Metall. Mater. Trans., 2008, 39A: 2378
- [15] Wang C, Wang B B, Wang D, et al. High-speed friction stir welding of SiCp / Al-Mg-Si composite [J]. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 2018, <https://doi.org/10.1007/s40195-018-0833-2>
- [16] Wang C, Wang B B, Xue P, et al. Fatigue behavior of friction stir welded SiCp/6092Al composite [J]. Acta Metall. Sin., 2018, Doi 10.11900/0412.1961.2018.00220  
(王晨, 王贝贝, 薛鹏等. SiCp/6092Al复合材料搅拌摩擦焊接头的疲劳行为研究 [J]. 金属学报, 2018; Doi 10.11900/0412.1961.2018.00220)
- [17] Wu C S, Su H, Shi L. Numerical simulation of heat generation, heat transfer and material flow in friction stir welding [J]. Acta Metall. Sin., 2018, 54: 265  
(武传松, 宿浩, 石磊. 搅拌摩擦焊接产热传热过程与材料流动的数值模拟 [J]. 金属学报, 2018, 54: 265)
- [18] Wang H L, Zeng X H, Zhang X M, et al. Microstructure and mechanical property of friction stir weld joints of dissimilar Al-alloys 5083 and 6061 [J]. Chin. J. Mater. Res., 2018; 32: 473  
(王洪亮, 曾祥浩, 张欣盟等. 5083和6061铝合金异种搅拌摩擦焊接头的组织和性能 [J]. 材料研究学报, 2018; 32: 473)
- [19] Li Y J, Fu R D, Li Y, et al. Tensile properties and fracture behavior of friction stir welded joints of Fe-32Mn-7Cr-1Mo-0.3N steel at cryogenic temperature [J]. J. Mater. Sci. Technol., 2018; 34: 157
- [20] Chen F F, Huang H J, Xue P, et al. Research progress on microstructure and mechanical properties of friction stir processed ultra-fine-grained materials [J]. Chin. J. Mater. Res., 2018, 32: 1  
(陈菲菲, 黄宏军, 薛鹏等. 搅拌摩擦加工超细晶材料的组织和力学性能研究进展 [J]. 材料研究学报, 2018; 32: 1)