6005A-T6铝合金型材静轴肩搅拌摩擦焊接头微观组织与力学性能

付宁宁[1]，郭丹[1]，丁亚萍[1]，孙博[2]，潘书华[2]，蒲炯[2]
1.中车南京浦镇车辆有限公司　江苏南京　210031
2.航天工程装备(苏州)有限公司　江苏苏州　215104

摘要：采用静轴肩搅拌摩擦焊对6005A-T6铝合金型材进行焊接，采用光学显微镜、显微硬度计、电子万能试验机和高频疲劳试验机等设备研究了静轴肩搅拌摩擦焊锁底接头的显微组织和力学性能。结果表明：锁底接头的搅拌区组织发生动态再结晶形成了细小的等轴晶粒（约5μm），热影响区晶粒尺寸较大（约100μm）。硬度测试结果显示，接头硬度近似呈现“W”形分布。焊接接头的平均屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为143MPa、191MPa和3.53%，接头拉伸试样均断裂于热影响区。锁底接头在1×10^7循环周次条件下的中值疲劳极限为112MPa；当置信度为95%和失效概率为5%时，接头的疲劳下极限为90.3MPa。本研究为静轴肩搅拌摩擦焊接技术在铝合金车体制造中的应用提供基础理论数据。

关键词：静轴肩搅拌摩擦焊；6005A-T6铝合金；微观组织；力学性能

Microstructure and mechanical properties of stationary shoulder stir friction welded joints of 6005A-T6 aluminum alloy sections

FU Ningning[1], GUO Dan[1], DIN Yaping[1], SUN Bo[2], PAN Shuhua[2], PU Jiong[2]
1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing 210031, Jiangsu, China
2. Aerospace Engineering Equipment (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215104, Jiangsu, China

Abstract: A 6005A-T6 aluminum alloy sections was subjected to stationary shoulder friction stir welding. The microstructure and mechanical properties of butt-lap joints produced by stationary shoulder friction stir welding were investigated using an optical microscope, microhardness tester, electronic universal testing machine and high-frequency fatigue testing machine. The results demonstrate that the microstructure of the butt-lap joint in the stir zone was occurred dynamic recrystallization, resulting in the formation of fine equiaxed grains with an average size of approximately 5μm. In contrast, the grain size in the heat affected zone was significantly larger, reaching an average of about 100μm. The results of the hardness test indicate that the hardness of joint exhibits a “W” distribution pattern. The mean yield strength, ultimate tensile strength and elongation of the welded joints were found to be 143MPa, 191MPa and 3.53%, respectively. It was observed that all the joint tensile specimens fractured in the heat affected zone. The median fatigue limit of the joint under the condition of 1×10^7 cycles is 112MPa, while the lower fatigue limit of the joint is 90MPa when the confidence level is 95% and the probability of failure is 5%. This study provides fundamental theoretical data for the application of stationary shoulder friction stir welding technology in the manufacturing of aluminum alloy car bodies.

Keywords: stationary shoulder friction stir welding; 6005A-T6 aluminum alloy; microstructure; mechanical properties

1 序言

搅拌摩擦焊（Friction Stir Welding，FSW）技术自问世以来，已展现出广阔的应用前景，在工程上也得到了广泛应用[1-3]。日本轻金属公司将FSW技术应用于地铁车辆的制造，完成的焊缝总长度超过3km，获得了良好的接头连接质量。日本住友公司采用FSW技术进行日本新干线车辆的制造[4]。事实证明，FSW技术的焊接质量完全能够满足车辆制造的技术要求。而传统FSW在焊接过程中因轴肩位置产热较多而导致焊缝沿厚度方向温度梯度大、焊接应力大等问题，同时传统FSW工艺在焊接过程中会在焊缝表面产生飞边，在焊接完成后飞边则需要额外进行机械去除，这无疑增加了工作量，同时降低了整体的生产效率[5, 6]。

英国焊接研究所（The Welding Institute，TWI）基于FSW原理，创新性地开发了静轴肩搅拌摩擦焊（Stationary Shoulder Friction Stir Welding，SSFSW）技术，以解决低热导率材料在焊接过程中温度梯度大、热输入不均匀等问题[7-9]。在SSFSW过程中轴肩固定不旋转，仅提供顶锻力，依赖轴针旋转与工件摩擦而产热，使轴针周围金属塑化。与传统的搅拌工具相比，静轴肩对焊缝顶部区域所施加的塑性变形较小，且不参与产热，极大地降低了焊缝沿厚度方向的温度梯度，提高了工艺稳定性，并显著改善了焊缝整体微观组织与力学性能的均匀性。此外，在焊接完成后，焊缝表面光滑且未发生减薄现象，在一定程度上降低了后续工序的复杂度。

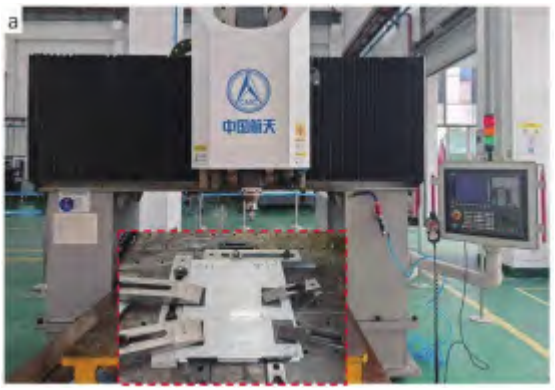
6005A是一种典型的A1-Mg-Si系中等强度铝合金，其具有较好的耐蚀性、优良的焊接性及良好的热变形性，可以挤压成复杂形状的薄壁型材[10-12]，广泛应用于轨道列车上。为了进一步发展和推广SSFSW技术，本研究以6005A-T6铝合金作为研究对象，开展低应力无飞边SSFSW研究，详细表征和分析了6005A-T6型材SSFSW接头微观组织、拉伸性能和疲劳性能，为SSFSW工业化应用积累基础数据。

2 试验材料与方法

试验材料为6005A-T6铝合金型材，尺寸为300mm×150mm×55mm，其中焊接位置厚度为5mm，母材化学成分见表1。试验采用的焊接设备为HT-JM8×22/2龙门式搅拌摩擦焊机。选用带三斜面的右旋螺纹锥形搅拌头对铝合金型材进行焊接，搅拌针长为5.2mm，根部直径为6.5mm，端部直径为3.9mm。搅拌头和静轴肩的材质均为H13钢，其中静轴肩的直径为14mm，搅拌头和静轴肩的形状如图1所示。通过多次试验，选用焊缝表面光滑、几乎不产生飞边，以及焊缝减薄量也较小的最佳成形工艺，焊接参数见表2。

表1 6005A-T6铝合金的化学成分（质量分数）（%）

Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
0.56	0.12	0.11	0.14	0.01	0.02	余量



a）搅拌摩擦焊机和焊接工装

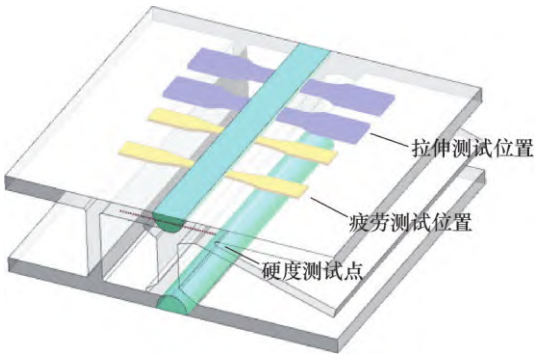
b）静轴肩　c）搅拌头装配　d）搅拌针

图1 龙门式搅拌摩擦焊机和静轴肩、搅拌头

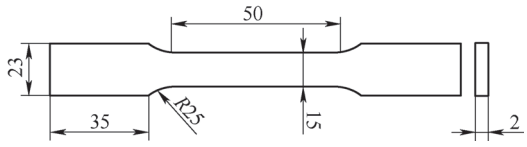
表2　SSFSW焊接参数

接头形式	编号	旋转速度/（r/min）	焊接速度/(mm/min)	下压量/mm
锁底接头	PZX-1	3000	1200	0.15

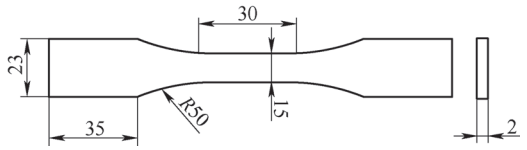
焊接结束后，在垂直于焊接方向切取金相试样，对金相试样依次进行粗磨、精磨和抛光，随后在Keller试剂（HF：HCl：HNO_3：H_2O＝2：3：5：190）中对精抛后的金相试样进行腐蚀，腐蚀时间为60s，接着在流水下冲洗，并采用无水乙醇冲洗并吹干后在体式显微镜下观察；为进一步观察接头各区晶粒特征，将制备好的金相样品在H_2SO_4：H_3PO_4：H_2O＝38：43：19的混合溶液中，以及电压和电流分别为25V和0.2A的条件下进行阳极覆膜，时间为80s，随后冲洗吹干，最后采用OLYMPUS BX53M金相显微镜的偏振光功能观察接头各区的晶粒形态。采用Wilson-Wolpert 401MVD数显显微维氏硬度计对SSFSW锁底接头的显微硬度进行检测，测试位置如图2a所示。以焊缝中心为界左右两侧各测20个硬度点，两个硬度点之间的间隔为1mm，加载载荷为100g（0.98N），保载时间为10s。沿垂直于焊接方向截取拉伸试样，试样尺寸如图2b所示。采用电子万能试验机在室温条件下进行焊接接头的拉伸测试，拉伸速率为1.0mm/min。采用高频疲劳试验机对接头的疲劳性能进行测试，疲劳试样尺寸如图2c所示。疲劳试验采用正弦波加载，加载频率为100～120Hz，应力比R（$\sigma_{min}/\sigma_{max}$）＝0.1。试验采用成组法进行，即在5个等间距的应力水平下进行焊接接头的疲劳性能测试，获得焊接接头的*S-N*曲线。



a）测试位置



b）拉伸试样尺寸



c）疲劳试样尺寸

图2　取样位置、尺寸和硬度测试位置示意

3　结果与讨论

6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头横截面整体形貌如图3所示，分别对PZX-1-1和PZX-1-2两条焊缝的微观组织进行观察。

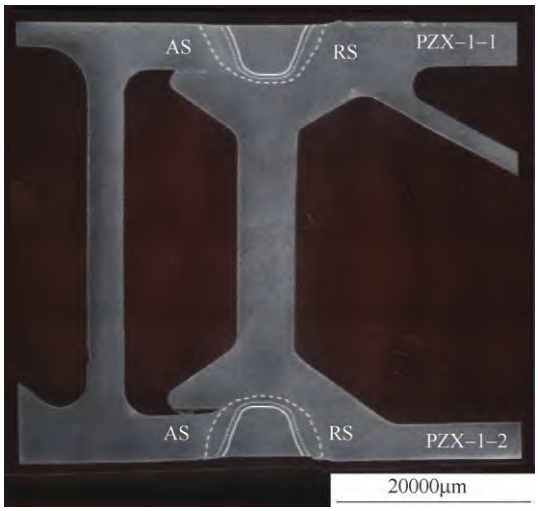
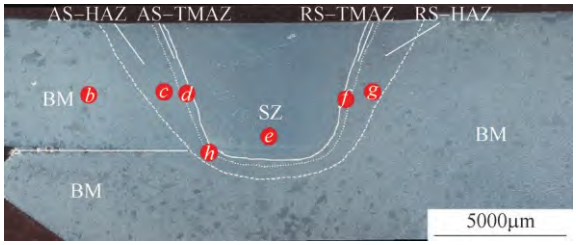
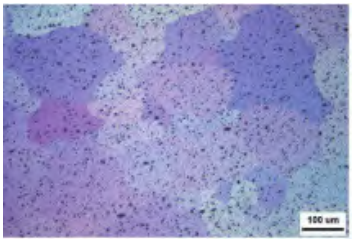


图3　6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头宏观形貌

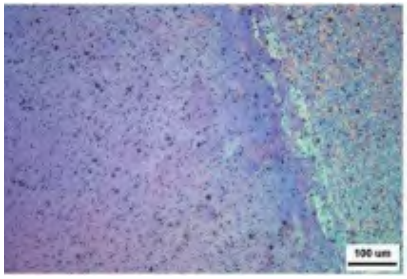
图4所示为 6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头（PZX-1-1）宏观形貌和各区微观组织。根据接头组织特征，划分了接头各区域（见图4a），并对接头各区红色点标记位置的微观组织特征进行观察。由图4可观察到，母材为等轴晶组织，焊后搅拌区仍呈等轴晶组织，但晶粒尺寸得到显著细化，平均晶粒尺寸约为5.3μm。紧邻搅拌区的是热机影响区，该区宽度约为85μm。热机影响区（TMAZ）与母材（BM）之间的区域为热影响区（HAZ），晶粒平均尺寸约为102μm。图5所示为6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头（PZX-1-2）宏观形貌和各区微观组织。由图5可知，搅拌区（SZ）晶粒平均尺寸约为4.7μm，热机影响区宽度约为84μm，热影响区平均晶粒尺寸约为98μm。



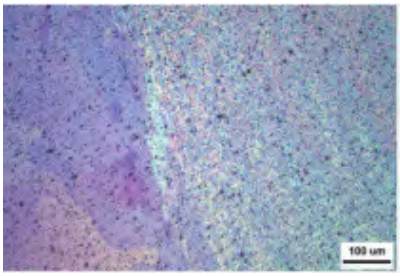
a）接头宏观形貌



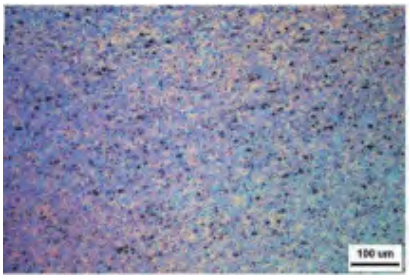
b）母材（*b*点）



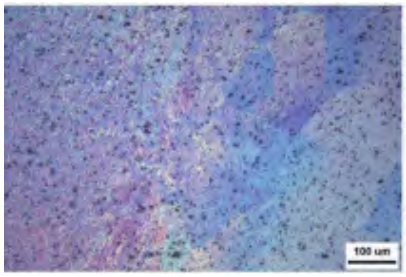
c）前进侧热影响区（*c*点）



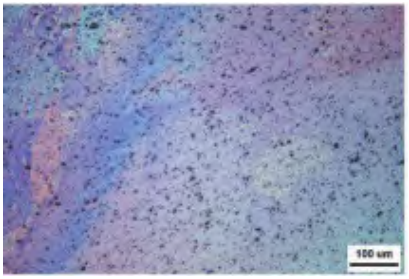
d）前进侧热机影响区（*d*点）



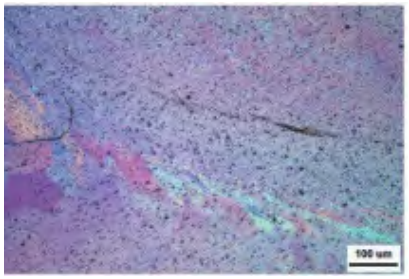
e）焊缝中心（*e*点）



f）后退侧热机影响区（*f*点）



g）后退侧热影响区（*g*点）



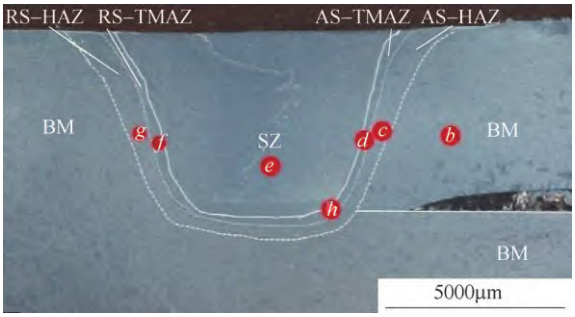
h）搅拌区底部“S”线（*h*点）

图4　6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头（PZX-1-1）宏观形貌和各区微观组织

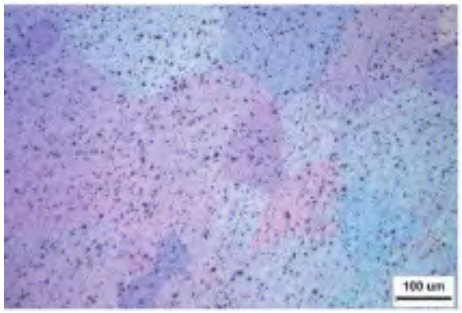
SSFSW锁底接头的搅拌区在焊接过程中直接受到搅拌针剧烈的机械搅拌作用，同时受到高温热作用，搅拌区材料因发生动态再结晶而形成细小的等轴晶。热机影响区位于热影响区与搅拌区之间，由于焊接过程中热机影响区受到的热循环温度和变形程度均低于搅拌区，晶粒的再结晶不完全，且受到搅拌区内金属流动产生的挤压力的作用，因此热机影响区内主要形成了拉长变形的晶粒。前进侧与后退侧热机影响区均与搅拌区有明显的分界线，靠近搅拌区一侧为较细小的变形等轴晶，存在明显的晶粒细化区域，靠近热影响区一侧为较粗大的变形等轴晶[13]。晶粒细化区的产生与金属塑性流动有关，在焊接过程中，搅拌针侧面切线方向的剪切力与母材金属流动相反，导致前进侧的塑性变形程度较大，前进侧热机影响区和搅拌区之间界线更明显。后退侧母材金属流动方向与前进侧相反，其变形程度较小，导致后退侧热机影响区与搅拌区之间的分界线更加模糊。热影响区未受到机械力的作用，仅受到焊接热循环的影响，导致热影响区晶粒相比于母材发生了长大[14]。此外，在搅拌区中心观察到从搅拌区底部以曲折的路径贯穿到搅拌区上表面的“S”线，在距离搅拌区上表面0～1.5mm内，不仅“S”线向后退侧偏移，而且越接近搅拌针根部，“S”线相对原始对接面的偏移越大。在距离搅拌区上表面1.5～5.3mm内，“S”线向前进侧偏移；在前进侧搅拌区底部观察到平行于原始搭接界面的“S”线。“S”线是搅拌摩擦焊接头中常见的特征，主要是由试板对接和搭接表面的氧化物有关。

PZX-1-2接头显微维氏硬度检测结果如图6所示。从图6可看出，搅拌区中心硬度较低，约为58HV，搅拌区左右两侧的硬度变化趋势基本一致，热机影响区及热影响区的硬度最低下降至54HV左右，靠近母材的热影响区硬度逐渐上升至85HV左右，母材区硬度开始变化平稳。

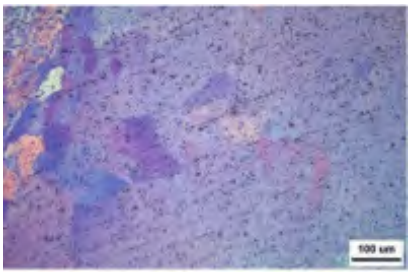
6005A-T6铝合金SSFSW接头的母材为T6峰时效状态，该状态下在α-Al中主要存在大量的β'相，



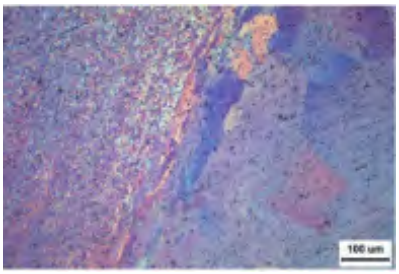
a）接头宏观形貌



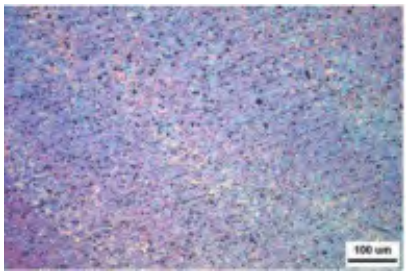
b）母材（*b*点）



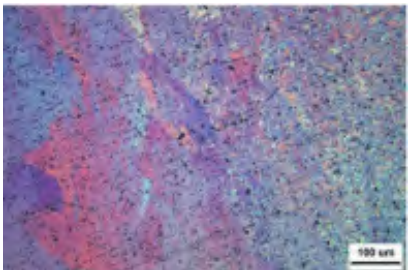
c）前进侧热影响区（*c*点）



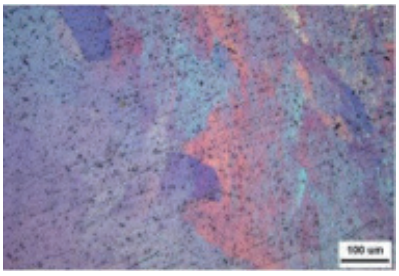
d）前进侧热机影响区（*d*点）



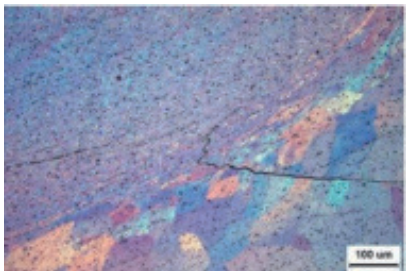
e）焊缝中心（*e*点）



f）后退侧热机影响区（*f*点）



g）后退侧热影响区（*g*点）



h）搅拌区底部“S”线（*h*点）

图5　6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头（PZX-1-2）宏观形貌和各区微观组织

根据焊接接头的硬度分布可知，SSFSW接头的横向显微硬度近似呈“W”形分布，母材硬度最高，伴随与搅拌区距离的减小，接头硬度不断变小，直至靠近热机影响一侧的热影响区硬度达到一个极小值，接着到热机影响区硬度开始升高，最终在搅拌区内硬度分布均匀[15]。搅拌区硬度值低于母材是因为在FSW焊接过程中，搅拌区在高温下剧烈变形，发生了动态再结晶，晶粒细小，同时高温也导致强化相溶解[16]；热机影响区尽管也同时受到热和机械力作用，但均比搅拌区受到的影响小，晶粒再结晶不完全，强化相粒子发生粗化，导致热机影响区的显微硬度略低于搅拌区的硬度；热影响区同样存在硬度较低的区域，是因为该区域受到热循环作用，强化相粒子发生粗化。前进侧热影响区硬度低于后退侧热影响区硬度，可能与后退侧的型材组织特征和焊接过程中的散热条件有关。相比于FSW接头，SSFSW接头显微硬度分布相对更均匀[17]，主要体现在硬度最低值上，SSFSW接头硬度最低值与搅拌区的硬度差值较小，这主要得益于SSFSW具有更低的焊接热输入。

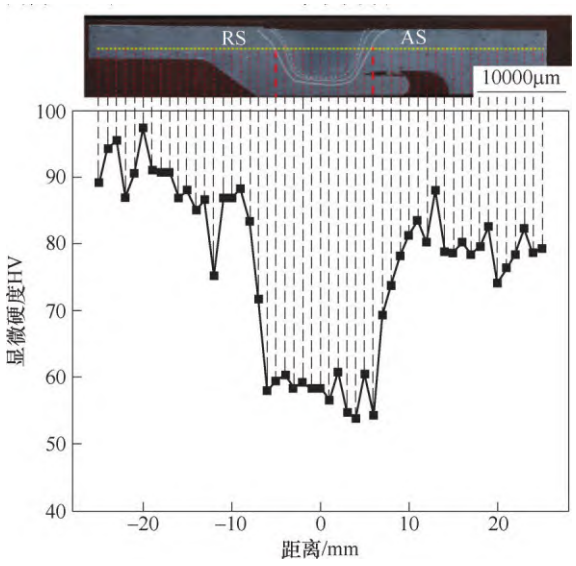
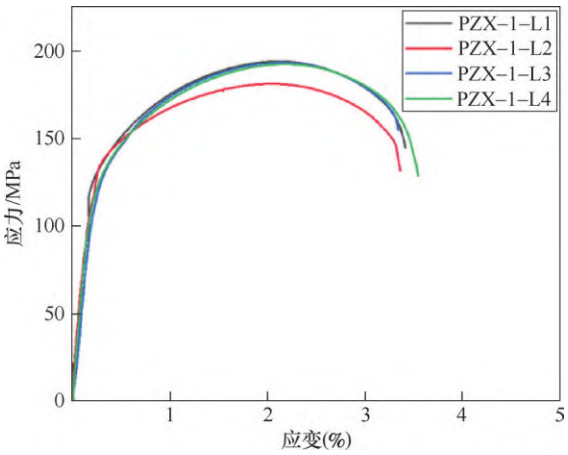


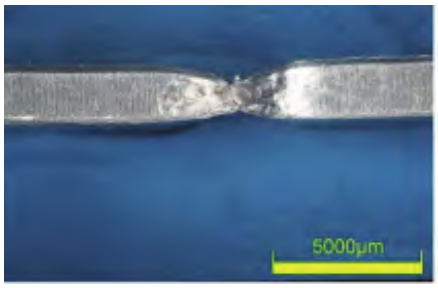
图6　PZX-1-2接头显微维氏硬度检测结果

在SSFSW过程中轴肩不旋转，只有轴针旋转，热量主要来源于旋转的轴针与工件之间的摩擦，而静止的轴肩几乎不产生热量。与此相对，在非静止FSW焊接过程轴肩与轴针一起旋转，轴肩、轴针同时与工件摩擦产生热量，且轴肩作用区域产生的热量通常更高。因此，在SSFSW中，热机影响区和热影响区相对较窄，塑性变形区域也更小。这种差异导致SSFSW中的焊接接头因温度梯度而引起的残余应力减少[18, 19]。简而言之，由于SSFSW热量产生和分布的特点，使焊接区域受到的热影响和塑性变形更为有限，因此有效降低了焊接过程中产生的残余应力。

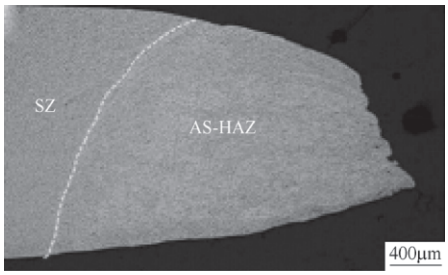
6005A-T6铝合金SSFSW接头拉伸性能试验结果如图7所示。由图7a可知，接头平均屈服强度为（143±2.5）MPa，抗拉强度为（191±11）MPa，伸长率为（3.53±0.19）%。拉伸试样均断裂于前进侧热影响区，如图7b、c所示。这就说明热影响区为焊接接头静态力学性能薄弱区，与硬度检测结果相符。



a）应力-应变曲线



b）PZX-1-L1拉伸试样断裂形貌



c）PZX-1-L1拉伸试样断口侧面金相

图7　6005A-T6铝合金SSFSW接头拉伸性能试验结果

6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头的疲劳性能测试结果见表3。由表3可知，最大应力为110～

表3　疲劳性能测试结果

应力级别/MPa	应力比 R	样品编号	频率/Hz	循环次数/次	结果
110	0.1	PL-X1-18	115	1.00×10^7	未失效
110	0.1	PL-X1-09	115	1.00×10^7	未失效
110	0.1	PL-X1-15	115	1.00×10^7	未失效
120	0.1	PL-X1-19	115	1.00×10^7	未失效
120	0.1	PL-X1-14	115	1.00×10^7	未失效
120	0.1	PL-X1-06	115	1.00×10^7	未失效
120	0.1	PL-X1-12	115	2.64×10^6	失效
120	0.1	PL-X1-03	115	1.27×10^6	失效
120	0.1	PL-X1-21	115	1.15×10^6	失效
130	0.1	PL-X1-22	115	2.23×10^6	失效
130	0.1	PL-X2-04	115	1.57×10^6	失效
130	0.1	PL-X2-05	115	1.48×10^6	失效
130	0.1	PL-X1-17	115	1.09×10^6	失效
130	0.1	PL-X1-04	115	4.41×10^5	失效
130	0.1	PL-X1-08	115	2.94×10^5	失效
140	0.1	PL-X2-08	115	8.21×10^5	失效
140	0.1	PL-X1-11	115	6.14×10^5	失效
140	0.1	PL-X1-10	115	6.11×10^5	失效
140	0.1	PL-X1-05	115	3.66×10^5	失效
140	0.1	PL-X2-03	115	2.82×10^5	失效
140	0.1	PL-X2-09	115	2.26×10^5	失效
150	0.1	PL-X1-13	115	5.48×10^5	失效
150	0.1	PL-X2-02	115	2.56×10^5	失效
150	0.1	PL-X2-06	115	2.01×10^5	失效
150	0.1	PL-X2-12	115	1.86×10^5	失效
150	0.1	PL-X2-01	115	1.16×10^5	失效
150	0.1	PL-X2-10	115	1.01×10^5	失效

150MPa，共5个应力水平，应力台阶为10MPa。由于该工程结构部件在实际工作过程中主要承受拉应力，所以选用应力比$R=0.1$的疲劳测试可较好地模拟这些部件在实际使用中所承受的应力状态。

疲劳性能测试数据统计参照GB/T 241776—2009《金属材料疲劳试验数据统计方案与分析方法》进行。

利用线性的数学模型分析*S-N*关系，其表达式为

$$x=\hat{b}-\hat{a}y \tag{1}$$

式中 x——循环次数的对数，即$x=\log N$；

y——应力级别（MPa）；

$\hat{a}$、$\hat{b}$——常数。

$\hat{a}$、$\hat{b}$分别由式（2）和式（3）求得，即

$$\hat{a}=-\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2} \tag{2}$$

$$\hat{b}=\bar{x}+\hat{a}\bar{y} \tag{3}$$

式中 x_i——每根试样循环次数的对数；

y_i——每根试样的应力级别；

x——所有试样循环次数的对数；

y——所有试样应力级别的平均值。

接头疲劳强度在置信度为（1－α）、自由度为v（样品个数$n-2$）、失效概率为P条件下的*S-N*曲线的下极限根据式（4）估算，即

$$\hat{x}_{(p,1-\alpha,v)}=\hat{b}-\hat{a}y-k_{(p,1-\alpha,v)}\hat{\sigma}_x\sqrt{1+\frac{1}{n}+\frac{(y-\bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{4}$$

式中 $k_{(p,1-\alpha,v)}$——正态分布的单边误差限；

$\sqrt{1+\frac{1}{n}+\frac{(y-\bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}$——对标准偏差估计值的修正，当样品数量足够多时，该修正值接近1；

$\hat{\sigma}_x$——平均*S-N*曲线的对数疲劳寿命的标准偏差。

$\hat{\sigma}_x$可由式（5）求得，即

$$\hat{\sigma}_x=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[x_i-(\hat{b}-\hat{a}y_i)]^2}{n-2}} \tag{5}$$

式中 n——样品个数；

$n-2$——自由度v。

根据疲劳性能测试结果，采用最小二乘法拟合得到了焊接接头*S-N*曲线，如图8所示，接头在1×10^7循环次数条件下的中值疲劳强度为112MPa。进一步对置信度（1－α）=95%和失效概率为5%时焊接接头的疲劳极限进行分析。根据GB/T 24176—2009附录B可知，$k_{(5\%,\ 95\%,\ 22)}=2.329$，通过式（4）和式（5）计算可得焊接接头*S-N*曲线下极限方程，见式（6），其曲线如图8所示（蓝色虚线）。

$$\hat{x}_{(5\%,\ 95\%)}=11.5922-0.0423y-2.329\times0.3315 \tag{6}$$

通过式（6）计算得到在循环次数为1×10^7、置信度（1－α）=95%和失效概率为5%时，6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头的疲劳强度下极限为90.3MPa。

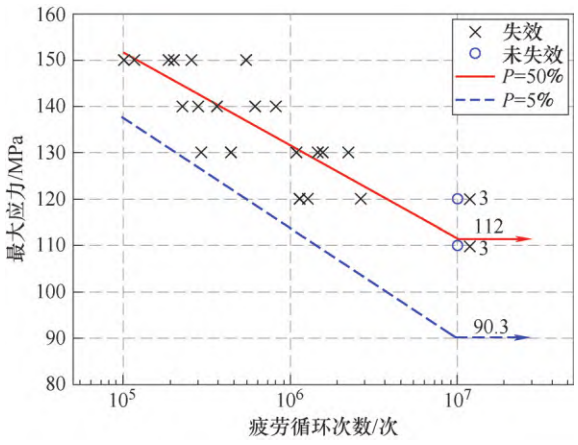


图8 6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头*S-N*曲线

4 结束语

本文通过研究6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头各区的微观组织、显微硬度、拉伸性能和疲劳性能，得到主要结论如下。

1）6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头的搅拌区组织发生动态再结晶，母材原始粗大等轴晶粒被细化至5μm左右；前进侧和后退侧热机影响区均与搅拌区有明显的分界线，热机影响区宽度约为85μm，该区域内晶粒被拉长，热影响区晶粒尺寸最大，约为100μm。

2）6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头的横截面显微硬度近似呈“W”形分布，即母材硬度最高，随着与搅拌区距离的减小，接头硬度不断降低，直至靠近热机影响区一侧的热影响区硬度达到一个极小值，随后在热机影响区硬度开始略微升高，最后搅拌区内硬度趋于稳定。

3）6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头的平均屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为143MPa、

191MPa和3.53%；焊接接头拉伸试样均断裂于前进侧热影响区，说明该区域为接头静态力学性能薄弱区。

4）6005A-T6铝合金型材SSFSW锁底接头在循环1×10^7次条件下的中值疲劳极限为112MPa；置信度为95%和失效概率为5%时，接头的疲劳下极限为90.3MPa。

参考文献：

[1] 周海鹏，邢松龄，韩赞东，等. 6005A-T6铝合金搅拌摩擦焊接头的疲劳性能分析[J]. 热加工工艺，2025（3）：35-40.

[2] 翟明，宋宏图，石磊，等. 搅拌摩擦焊在轨道交通领域的应用现状与发展前景[J]. 金属加工（热加工），2024（1）：1-7.

[3] 任延静，张欣盟，薛鹏，等. 6005A铝合金挤压型材搅拌摩擦焊接头的疲劳性能[J]. 材料研究学报，2021，5（4）：271-276.

[4] 赵明书，董春林，栾国红，等. 搅拌摩擦焊在列车制造中的优势分析及应用现状[J]. 航空制造技术，2009（21）：66-68.

[5] HUANG Y X，MA X T，WANG L J，et al. Innovative technology for inherent issues in friction stir welding[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology，2020，40（4）：105.

[6] FARHANG M，SAM-DALIRI O，FARAHANI M，et al. Effect of friction stir welding parameters on the residual stress distribution of Al-2024-T6 alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering and Sciences，2021，15（1）：7684-7694.

[7] JONATHAN M. 固定轴肩搅拌摩擦焊技术的发展[J]. 电焊机，2014，44（4）：31-38.

[8] 廖文洁，张璟瑜，赖鸥，等. 静轴肩搅拌摩擦焊在轨道车辆车体上的工程应用研究[J]. 金属加工（热加工），2021（5）：72-77.

[9] 黄斌. 基于静轴肩搅拌摩擦焊的增材制造技术研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2016.

[10] 陈宁凯，王威威，付宁宁，等. 铝合金车体双轴肩搅拌摩擦焊接头组织及力学性能研究[J]. 金属加工（热加工），2022（8）：34-37.

[11] 史耀武. 中国材料工程大典[M]. 北京：化学工业出版社，2006.

[12] 董鹏，孙大千，李洪梅，等. 6005A-T6铝合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能特征[J]. 材料工程，2012（4）：27-31.

[13] 邱宇，孟强，董继红，等. 6061-T6铝合金搅拌摩擦焊工艺及性能研究[J]. 塑性工程学报，2021，28（2）：86-91.

[14] 方振邦，张志强，李颖，等. 7N01S-T5铝合金厚板搅拌摩擦焊接头的晶间腐蚀行为[J]. 材料导报，2019，33（2）：304-308.

[15] 李文晓，范美华，徐晓霞，等. 不同接头形式6061-T6铝合金搅拌摩擦焊界面迁移特点及性能差异[J]. 轻合金加工技术，2022，50（3）：53-59.

[16] 李颖. AZ31B和7075搅拌摩擦焊接头组织与力学性能研究[D]. 长沙：湖南大学，2015.

[17] 李志强，飞尚才. 6061铝合金FSW焊接接头组织和力学性能分析[J]. 焊接技术，2024，53（8）：44-49.

[18] SUN T，ROY M J，STRONG D，et al. Comparison of residual stress distributions in conventional and stationary shoulder high-strength aluminum alloy friction stir welds[J]. Journal of Materials Processing Technology，2017，242：92-100.

[19] SUN T，REYNOLDS A P，ROY M J，et al. The effect of shoulder coupling on the residual stress and hardness distribution in AA7050 friction stir butt welds[J]. Materials Science and Engineering：A，2018，735：218-227.

（收稿日期：20241119）