

转向架用 SMA490BW 钢焊接接头超高周疲劳性能

何柏林¹, 叶 斌¹, 邓海鹏¹, 李 力¹, 魏 康²

(1. 华东交通大学 材料科学与工程学院, 南昌 330013; 2. 中国中车南京浦镇车辆有限公司, 南京 210031)

摘 要: 采用超声疲劳试验方法对 SMA490BW 钢焊接接头的超高周疲劳性能进行研究, 通过 X 射线应力仪对焊接试样残余应力进行测试, 采用扫描电镜对疲劳裂纹的萌生、扩展及疲劳断裂机理进行观察和分析。结果表明, SMA490BW 钢母材的疲劳性能远高于焊接接头, 在 1×10^8 循环周次条件下, 接头的疲劳强度为 141 MPa, 仅为母材的 44.2%。接头裂纹主要萌生于焊趾表面缺陷处, 疲劳断裂机理表现为准解理断裂, 并伴有塑性变形痕迹。焊趾处几何不连续造成的应力集中和焊缝及其附近区域一定的残余拉应力, 以及接头各微区组织和性能的不均匀性, 是导致焊接接头疲劳性能偏低的主要原因。

关键词: 焊接接头; 超高周疲劳; 裂纹萌生; 残余应力; 应力集中

中图分类号: TG 405 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400037

0 序 言

转向架焊接结构在长期服役过程中, 实际承受高达 $1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^{10}$ 周次的循环交变载荷, 各国学者和工程技术人员也日益重视金属材料在 1×10^7 周次以上的超高周疲劳性能^[1]。然而, 目前的研究结果表明, 金属材料(钢铁、铝合金、钛合金、镁合金等)及其焊接接头在 1×10^7 循环周次以上超高周范畴内仍会发生疲劳失效, 即不存在传统的疲劳极限, 并且加载的应力幅值较高周疲劳时更低, 传统的疲劳设计准则对材料已不再安全^[2-4]。Murakami 等人^[5]在分析轴承钢(JIS SUJ2)超高周疲劳断裂机理时认为, S-N 曲线的形状与外加载荷特征、环境介质、加载频率、夹杂物尺寸、残余应力等因素有关, 可表现出阶梯下降型、持续下降型、双线阶梯型以及多阶段疲劳等特征。高周疲劳的裂纹通常萌生于材料表面机械加工痕迹处。而在失效循环数大于 1×10^7 周次的超长寿命区间, 对于组织均匀的金属母材而言, 裂纹多起源于内部非金属夹杂物处, 疲劳断口源区呈“鱼眼”特征形貌。此外, 相关研究表明裂纹也会在表面沟槽或亚表面非缺陷处萌生^[6-8]。对于焊接接头而言, 疲劳裂纹主要萌生在接头焊趾的表面几何非连续处或内部焊接缺

陷处(如非金属夹杂物、气孔等)^[9-11]。

文中以高速动车组转向架焊接构架常用材料 SMA490BW 钢为研究对象, 运用超声疲劳试验机对 SMA490BW 钢母材及 MAG 焊接接头进行超高周疲劳试验, 获得疲劳 S-N 曲线。采用扫描电镜观察分析焊接接头疲劳试样断口, 揭示了其疲劳断裂机理; 并用金相显微镜观察焊接接头的疲劳裂纹扩展路径, 研究其裂纹扩展行为及机理。定量分析了接头焊趾处的残余应力、应力集中因素对 SMA490BW 钢焊接接头超高周疲劳性能的影响。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验所用材料为 SMA490BW 钢, 它是日本进口的低合金高强度热轧耐候钢, 其化学成分和力学性能分别如表 1 和表 2 所示。

1.2 焊接工艺试验及试样制备

接头形式采用对接接头, 焊接材料采用直径 1.2 mm 的 TH550-NQ-II 焊丝, 焊接方式为 tMAG/135, 混合保护气体为 80%Ar + 20%CO₂。焊接钢板厚度为 12 mm, 加工 V 形坡口, 坡口角度为 60°, 组装间隙为 2~3 mm。母材试样为变截面圆柱状, 其具体尺寸及实物如图 1 所示。焊接接头试样选用含有较长等截面且焊缝位于正中部的薄板试样, 试样具体尺寸及其实物如图 2 所示。

表 1 SMA490BW 钢的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of SMA490BW steel

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
≤0.18	0.15~0.65	≤1.40	≤0.035	≤0.006	0.30~0.50	0.05~0.30	0.45~0.70

表 2 SMA490BW 钢的力学性能
Table 2 Mechanical properties of SMA490BW steel

弹性模量 E /MPa	屈服强度 R_{el} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)	弯曲 180°	-40℃冲击吸收能量 A_{KV} /J
206 000	≥365	490~610	≥19	合格	≥27

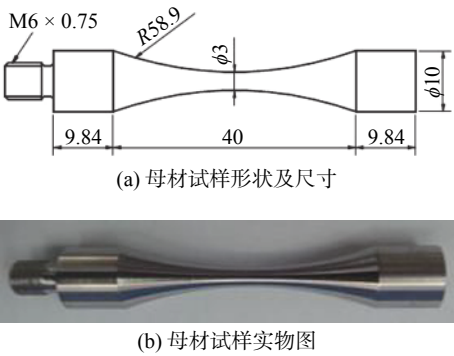


图 1 母材试样形状尺寸及实物图 (mm)
Fig. 1 Dimensions and physical map of base metal test specimen

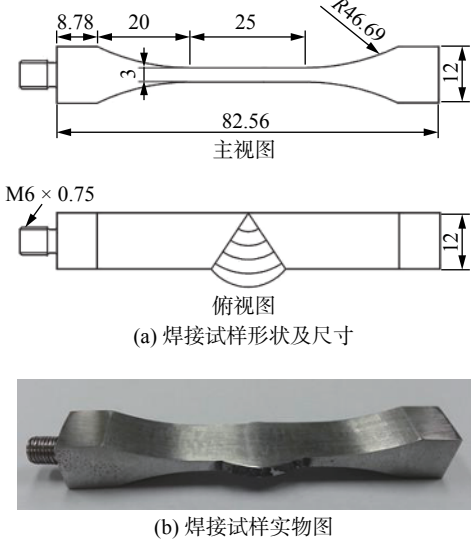


图 2 焊接接头试样形状尺寸及实物图 (mm)
Fig. 2 Dimensions and physical map of welded joint test specimen

1.3 超声疲劳及断口观察试验

母材及焊接接头的超高周疲劳试验均在日本岛津出产的 USF-2000 超声疲劳试验机上进行, 加载频率为 20 kHz, 应力比 R 为-1, 试验在室温 (25℃) 下进行. 同时采用压缩空气冷却试样, 试验间歇比为 200:

600, 若试样加载循环数达到 1×10^9 周次仍未断裂, 试验自动停止. 试验前采用金相砂纸对试样中间圆弧过渡部位沿纵向机械抛光处理, 从而消除表面机械加工刀痕的影响. 借助 JSM-6360LA 和 FEI Nova NanoSEM 450 扫描电镜对焊接接头疲劳断口的微观形貌特征进行研究, 分析高周及超高周阶段裂纹的形核和扩展机理, 从而判断焊接接头的微观断裂机制.

1.4 裂纹扩展路径观察及残余应力测定试验

采用德国 ZEISS 公司生产的 Axio Vert. A1 型倒置万能金相显微镜对焊接接头的疲劳裂纹扩展路径进行观察分析, 研究其裂纹扩展行为和机理. 同时, 采用芬兰 Stresstech Oy 公司生产的 XSTRESS 3000 便携式应力仪对焊接试板、接头疲劳试样焊趾区域的残余应力 (包括横、纵向应力) 进行测试, 分析残余应力对焊接接头疲劳性能的影响.

1.5 焊接接头应力集中系数的有限元分析

采用 JSM-6360LA 扫描电镜观察焊接接头焊趾区的几何轮廓形状, 根据外形轮廓建立模型, 不考虑残余应力和焊接缺陷的影响, 采用有限元软件 ABAQUS 对接头进行应力分析. 选用 C3D20 六面体单元进行网格划分, 在焊趾区域细化网格. 设置模型的边界条件, 接头试样左端完全固定, 右端施加 3 600 N 的均匀拉伸载荷^[12].

2 试验结果及分析

2.1 疲劳 S-N 曲线分析

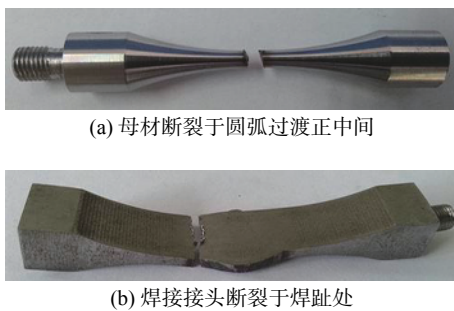
SMA490BW 钢母材试样均断裂于圆弧过渡正中间, 这是由于试样中部应力最大, 如图 3a 所示. 焊接接头试样均断裂于焊趾, 疲劳裂纹往往萌生于应力集中严重、组织不均匀的焊趾部位, 如图 3b

所示. 依据应力寿命方程 $S^m N = C$, 采用 Origin 软件分别拟合各组试样的疲劳试验数据, 得出 SMA490BW 钢母材和焊接接头的名义应力 S-N 曲线, 如图 4 所示, 应力范围 $\Delta\sigma$ 和疲劳寿命 N 值均表示为以 10 为底的对数形式, 箭头标注的是超过 1×10^9 循环周次仍未断裂的试样. 母材试样的 S-N 曲线关系见式 (1), 焊接接头试样的 S-N 曲线关系见式 (2), 式 (3).

$$\lg N + 60.39 \lg \Delta\sigma = 159.23, 1 \times 10^5 \leq N \leq 1.0 \times 10^9 \quad (1)$$

$$\lg N + 7.25 \lg \Delta\sigma = 22.54, 1 \times 10^5 \leq N \leq 6.45 \times 10^6 \quad (2)$$

$$\lg N + 45.03 \lg \Delta\sigma = 104.73, 6.45 \times 10^6 \leq N \leq 1.0 \times 10^9 \quad (3)$$



(a) 母材断裂于圆弧过渡正中间

(b) 焊接接头断裂于焊趾处

图 3 试样疲劳断裂位置

Fig. 3 Fatigue fracture position of specimen

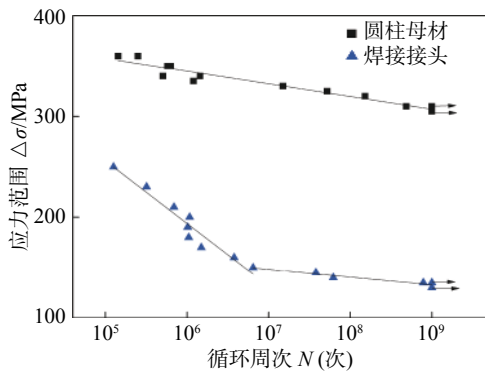


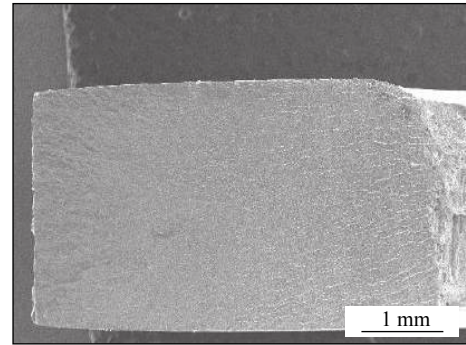
图 4 母材和焊接接头试样的 S-N 曲线

Fig. 4 S-N curves of base metals and welded joints

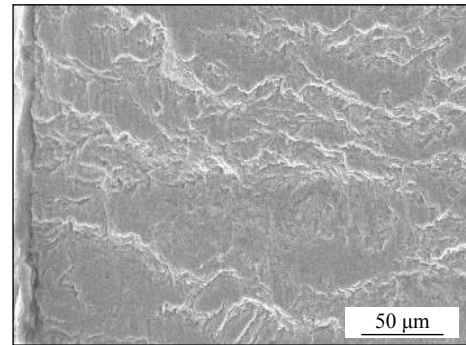
由图 4 可以看出, 在高周和超高周疲劳阶段 (即 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^9$ 循环周次), 母材试样的应力寿命 (S-N) 曲线表现为连续下降趋势; 而焊接接头试样的 S-N 曲线存在两个明显的阶段, 高周阶段 S-N 曲线下降迅速, 超高周阶段下降较为缓慢. 无论是母材还是焊接接头试样, 在超长寿命区间 (超过 1×10^7 循环周次) 仍会发生疲劳失效, 进一步证明了 SMA490BW 钢材料不存在传统意义上的疲劳极限. 对于服役寿命超过 1×10^7 循环周次的焊接构件, 仍采用传统疲劳极限准则来设计是相当危险的.

2.2 疲劳断口分析

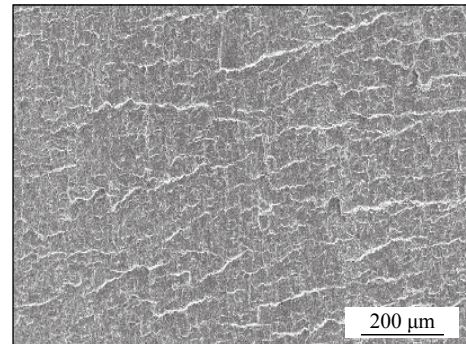
SMA490BW 钢焊接接头的高周及超高周疲劳断口的 SEM 照片分别如图 5、图 6 所示. 由图 5b、图 6b 观察可知, 高周及超高周疲劳裂纹均萌生于焊趾表



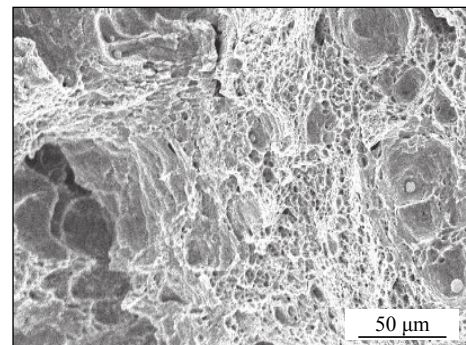
(a) 整体形貌



(b) 疲劳源区



(c) 裂纹扩展区



(d) 瞬时断裂区

图 5 焊接接头高周疲劳断口 ($\Delta\sigma = 160$ MPa, $N = 3.79 \times 10^6$)

Fig. 5 High cycle fatigue fracture surface of welded joint

面缺陷处。断口上存在多个裂纹萌生源, 裂纹早期扩展方向与断裂面扩展路径相同, 能观察到较清晰的疲劳小弧线。对于焊接接头试样, 高周及超高周疲劳裂纹源大多位于焊趾表面的缺陷处 (图 7b, 图 7c), 个别试样的裂纹起源于焊接缺陷夹渣处 (图 7a), 未发现裂纹从试样内部夹杂物或气孔处起裂的情况。

裂纹扩展区均呈现类似解理的河流花样, 出现大量不规则的撕裂棱线条, 同时伴有解理台阶和二次裂纹。瞬断区主要表现为大小不一的等轴韧窝形貌, 表明 SMA490BW 钢焊接接头的疲劳断裂是介于解理断裂与韧窝之间的一种过渡断裂形式, 即准解理断裂。

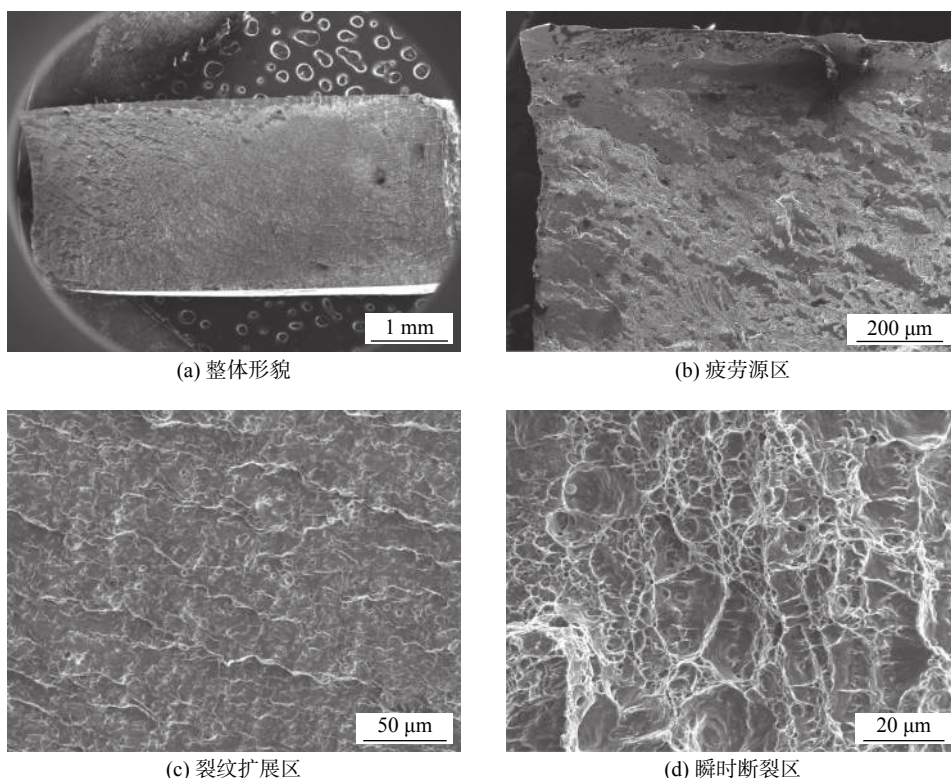


图 6 焊接接头超高周疲劳断口 ($\Delta\sigma = 135 \text{ MPa}$, $N = 7.86 \times 10^8$ 周次)

Fig. 6 Very high cycle fatigue fracture surface of welded joint

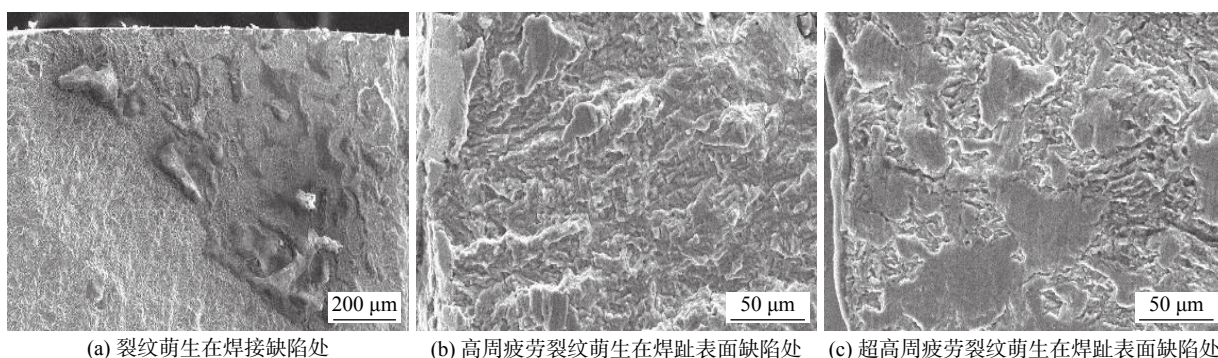


图 7 焊接接头的裂纹源

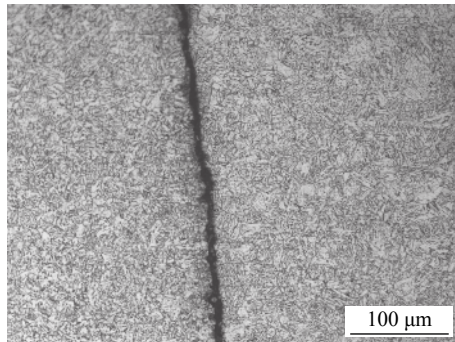
Fig. 7 Crack source of welded joints

2.3 焊接接头裂纹扩展路径分析

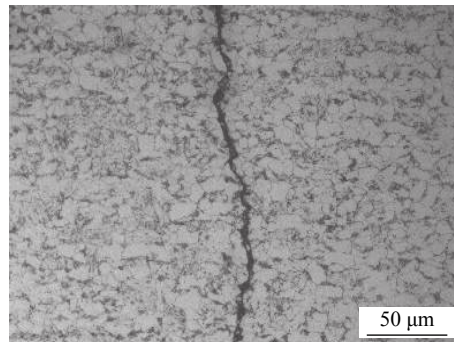
图 8 为焊接接头疲劳裂纹扩展路径的全貌, 由图可知, 裂纹从焊趾表面组织内萌生并沿内部扩展, 裂纹扩展方向垂直于试样加载应力方向, 如黑色箭

头所示, 扩展路径较为平直, 出现少量的分叉裂纹。由于第 I 阶段的疲劳裂纹扩展时间很短, 尖端塑性区只局限几个晶粒内, 文中并未观察到该阶段典型的“Z”字形扩展路径。图 9a 为熔合区内裂纹扩展

第 II 阶段前期的形貌, 由于熔合区是焊缝与母材不规则结合形成的区域, 组织为细条状的先共析铁素体和少量珠光体, 化学成分和力学性能均有较大的不均匀性, 裂纹容易在该区萌生并快速扩展. 图 9b 为母材区裂纹扩展第 II 阶段后期的形貌, SMA490BW 钢母材组织由粗大的铁素体和少量珠光体组成, 裂纹大多穿过粗大的铁素体扩展.



(a) 前期



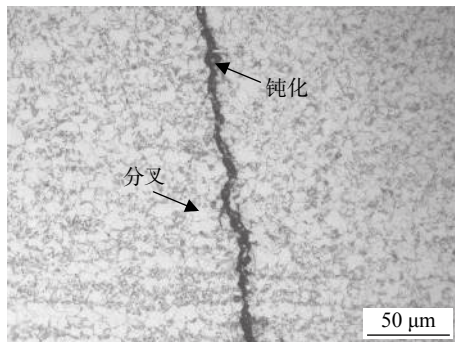
(b) 后期

图 9 第 II 阶段的疲劳裂纹扩展路径

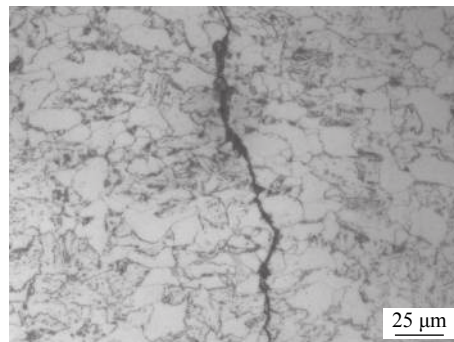
Fig. 9 Fatigue crack propagation path at stage II

在裂纹扩展过程中, 会出现裂尖钝化及分叉 (二次裂纹) 现象, 见图 10a. 二次裂纹会消耗主裂纹的扩展能量, 在一定程度上延缓裂纹的扩展. 图 10b

中的组织晶界清晰, 裂纹偏折角度不大, 并伴有明显塑性变形的痕迹, 可以看出裂纹扩展主要表现为穿晶扩展.



(a) 裂尖钝化及分叉



(b) 穿晶断裂

图 10 疲劳裂纹扩展特征

Fig. 10 Fatigue crack propagation characteristics

2.4 焊接接头残余应力及应力集中分析

焊接试板以及接头疲劳试样焊趾区域的残余应力测试结果如表 3 所示, 从表 3 的数据可知, 由于采用 tMAG 技术焊接 SMA490BW 钢板后并没有进行退火处理, 焊接试板焊趾处存在较大的残余拉应力, 横向残余应力高达 266.71 MPa. 接头疲劳试样是采用线切割机从焊接试板中切割所得, 切割过程中接头焊趾部位的变形约束去除, 残余应力得到大幅释放, 最低残余应力值为 23.62 MPa. 相比

于焊接试板, 接头疲劳试样焊趾处的横、纵向残余应力分别释放了 243.09 和 224.95 MPa, 释放幅度依次为 91.1% 和 91.7%.

通常来讲, 材料的临界应力强度因子 ΔK_{th} 值与自身的组织性能、外加载荷中的平均应力有关. 存在平均应力作用的条件下, ΔK_{th} 值的表达式^[13]

$$\Delta K_{th} = \frac{1.2(\Delta K_{th})_0}{1 + 0.2 \left(\frac{1+R}{1-R} \right)} \quad (4)$$

表 3 试样焊趾区域的残余应力
Table 3 Residual stresses in the weld toe area

试样	横向残余应力 σ_x/MPa	误差 $a(\%)$	纵向残余应力 σ_y/MPa	误差 $b(\%)$
焊接试板	266.71	16.25	245.27	13.64
接头疲劳试样	23.62	13.51	20.32	10.59

当焊接接头承受循环交变载荷作用时,焊趾表面的残余拉应力与外加载荷中一部分拉应力相互作用,会增大接头试样实际承受的平均应力(即 R 值),由式(4)可知, R 值的增大会降低裂纹尖端的临界应力强度因子 ΔK_{th} 值,有利于疲劳裂纹的早期扩展,从而降低焊接接头的疲劳性能。

焊接接头由于余高的存在,以及焊趾处几何轮廓的不连续性,导致焊趾处存在宏观应力集中。同时,焊接缺陷(如未熔合、裂纹、气孔、夹渣)也是应力集中的根源之一,这些因素均会显著降低接头的疲劳强度。焊接接头焊趾区的几何轮廓形状如图11a所示,焊趾过渡区域较为尖锐,圆弧过渡半径较小。图11b为接头试样的主应力云图,其对应的应力集中系数为1.686。因此,与母材试样相比,焊接接头的疲劳性能偏低与焊趾处几何形貌不连续引起的应力集

中有很关系,此外焊缝及其附近区域一定数值的残余拉应力,以及接头各微区显微组织和性能的不均匀性也有一定的联系。

3 结 论

(1) 由疲劳 S-N 曲线可知,无论是母材试样还是焊接接头试样,在超长寿命区间(超过 1×10^7 循环周次)仍会发生疲劳失效,进一步证明了 SMA490BW 钢不存在传统意义上的疲劳极限。

(2) 在 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^9$ 循环周次内,母材的疲劳性能远高于焊接接头。在 1×10^8 循环周次条件下,焊接接头的疲劳强度为 141 MPa,仅为母材的 44.2%。

(3) 焊接接头试样的疲劳裂纹大多从焊趾表面的缺陷处萌生,个别试样的裂纹萌生于焊接缺陷夹渣处;裂纹扩展区均呈现清晰的解理河流花样,瞬断区主要表现为大小不一的等轴韧窝形貌,断口微观形貌表明,焊接接头的疲劳断裂机制为准解理断裂。焊接接头的裂纹扩展路径较为平直,裂纹扩展过程中,会出现裂尖钝化及分叉(二次裂纹)现象,表现为典型的穿晶扩展,并伴有明显塑性变形的痕迹。

(4) 焊接接头焊趾处存在几何形貌不连续引起的应力集中对接头疲劳性能有较大影响,焊缝及其附近区域一定数值的残余拉应力和接头各微区的显微组织和力学性能的不均匀性对导致焊接接头的疲劳性能远低于母材也有一定的作用。

参考文献:

- [1] 何柏林, 张枝森, 谢雪涛, 等. 加载环境对合金超高周疲劳行为的影响[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(5): 51-57.
He Bolin, Zhang Zhisen, Xie Xuetao, et al. Influence of the loading environment on ultra-high-cycle fatigue of alloy material[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(5): 51-57.
- [2] Hong Y S, Zhao A G, Qian G A, et al. Fatigue strength and crack initiation mechanism of very-high-cycle fatigue for low alloy

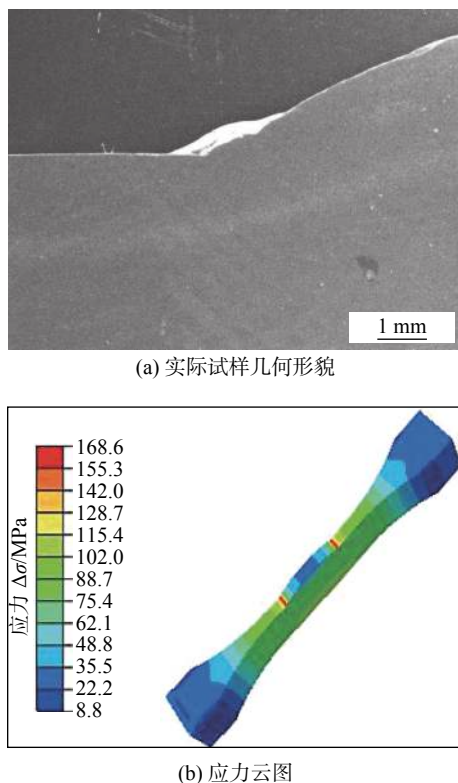


图 11 焊接接头焊趾处的几何形貌及主应力云图

Fig. 11 Geometrical features at weld toe and principal stress contour of welded joint

- steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(8): 2753 – 2762.
- [3] 何 超, 崔仕明, 刘永杰, 等. 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.
- He Chao, Cui Shiming, Liu Yongjie, *et al.* Effect of pore on super long fatigue life of aluminium alloy welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(11): 18 – 22.
- [4] 马 婧, 赵子华, 聂宝华, 等. TC21 钛合金电子束焊接接头超高周疲劳行为研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(12): 69 – 75.
- Ma Jing, Zhao Zihua, Nie Baohua, *et al.* Research on very high cycle fatigue behavior of the electron beam weldment for TC21 titanium alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(12): 69 – 75.
- [5] Murakami Y, Yokoyama N N, Nagata J. Mechanism of fatigue failure in ultralong life regime[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures, 2002, 25(8–9): 735 – 746.
- [6] Mayer H, Haydn W, Schuller R, *et al.* Very high cycle fatigue properties of bainitic high carbon-chromium steel[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(2): 242 – 249.
- [7] Chai G. The formation of subsurface non-defect fatigue crack origins[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(11): 1533 – 1539.
- [8] 闫桂玲, 王 弘, 康国政, 等. 高速列车用 6065A 铝合金超高周疲劳性能试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2014, 35(1): 67 – 71.
- Yan Guiling, Wang Hong, Kang Guozheng, *et al.* Experimental study on the very high cycle fatigue properties of 6065 aluminum alloy for high speed train[J]. China Railway Science, 2014, 35(1): 67 – 71.
- [9] 刘龙隆, 轩福贞, 朱明亮. 25Cr2Ni2MoV 钢焊接接头的超高周疲劳特性 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(4): 25 – 31.
- Liu Longlong, Xuan Fuzhen, Zhu Mingliang. Very high cycle fatigue behavior of 25Cr2Ni2MoV steel welded joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 25 – 31.
- [10] 邓彩艳, 王 红, 龚宝明, 等. 加载频率及焊接缺陷对 5A06 铝合金 TIG 焊接头超高周疲劳性能的影响 [J]. 焊接学报, 2015, 36(12): 61 – 64.
- Deng Caiyan, Wang Hong, Gong Baoming, *et al.* Effects of loading frequency and welding defects on veryhigh-cycle fatigue properties of 5A06 aluminum alloy TIG welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(12): 61 – 64.
- [11] 王东坡, 龚宝明, 吴世品, 等. 焊接接头与结构疲劳延寿技术研究进展综述 [J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(6): 1 – 14.
- Wang Dongpo, Gong Baoming, Wu Shipin, *et al.* Research review on fatigue life improvement of welding joint and structure[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(6): 1 – 14.
- [12] 魏 康, 何柏林. 基于 ABAQUS 的转向架十字焊接接头应力集中系数分析 [J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(1): 41 – 44.
- Wei Kang, He Bolin. Analysis of stress concentration coefficient of welded cross joint of bogie based on ABAQUS[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(1): 41 – 44.
- [13] 刘 锁. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1977.
-
- 第一作者简介:** 何柏林, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师. 主要从事焊接结构强度与断裂方面的科研和教学工作. 发表论文 60 余篇. Email: hebolin@163.com